Поліський національний університет
Міністерства освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ІЛЬЧЕНКО АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.436 : 665.75

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ АВТОМОБІЛІВ КОНТРОЛЕМ ВИТРАТ РІДКИХ БІОПАЛИВ

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Галузь знань – 27 Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.
_____ А. В. Ільченко

Науковий консультант Безвесільна Олена Миколаївна, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України

Вінниця – 2025

АНОТАЦІЯ

Ільченко А. В. Наукові основи створення методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем витрат рідких біопалив.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту (27 Транспорт). – Вінницький національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Вінниця, 2025.

Експлуатація транспортних двигунів внутрішнього згорання, зокрема і автомобільних, обов'язково має передбачати облік витрат палив, оскільки вони є комплексним діагностичним параметром транспортного засобу, показником технічного стану всіх його агрегатів, систем і вузлів. Паливна економічність впливає на собівартості транспортної роботи, яка потребує врахування і аналізу, тощо. Результати вимірювання витрат палив також використовуються у процесі розрахунків показників процесу сумішоутворення, оптимізації складу паливо-повітряних сумішей для різних швидкісних і навантажувальних режимів роботи двигуна внутрішнього згорання.

Питання диверсифікації використання енергетичних ресурсів для України виходить на перший план, особливо в умовах повномасштабного вторгнення росії в Україну.

В дисертації вирішено актуальну наукову проблему економії моторних рідких біопалив за допомогою розрахунків і замірів їх витрат з використанням розроблених високоточних приладів вимірювання, що дає можливість нормування та контролю витрат біопалив з різними об'ємними концентраціями різних біологічних домішок.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження витрат рідких біопалив двигуном автомобіля за роботи на паливах з

використанням розробленого термоанемометричного витратоміра, який відрізняється від існуючих розширеним діапазоном вимірювання витрат палив (біопалив), що використовуються на автомобільному транспорті, підвищеною точністю вимірювань, пристосовуваністю до змін фізико-хімічних властивостей різних за складом рідких біопалив та до специфічних транспортних і дорожніх умов експлуатації автотранспортних засобів.

За результатами дисертаційної роботи встановлено нижченаведене:

І. Теоретичні дослідження

1. Розглянуто основні фізико-хімічні властивості компонент біопалив та їх вплив на роботу двигунів внутрішнього згорання. Підкреслено, що для двигунів внутрішнього згорання сьогодні перспективною є заміна палив нафтового походження альтернативними паливами біологічного походження, які мають низку переваг порівняно з традиційними мінеральними: можливість виробництва з відновлювальної сировини і сільськогосподарських продуктів, вуглецева нейтральність, екологічність, повна біологічна розчинність за атмосферних умов тощо.

2. Показано основні світові тенденції зростання виробництва біопалив, зокрема, у таких країнах, як США, країни ЄС, Індонезія та Аргентина. Відмічено, що, незважаючи на ситуацію, коли цивілізоване людство, почавши відновлюватись після пандемії коронавірусу, зіткнулося з новим викликом – військовим вторгненням росії в Україну – ринок біопалив продовжує активно розвиватися.

3. Аналіз нормативної бази для визначення норм витрат палив показує, що для врахування різноманіття умов експлуатації автотранспортних засобів (крім базових норм витрат палив) потрібно використовувати велику кількість корегувальних коефіцієнтів. Щоб

встановити норми та здійснювати контроль за витратами біопалив автотранспортними засобами на основі чинної законодавчої бази потрібно проводити експериментальні дослідження витрат в реальних умовах експлуатації, що є досить трудомістским та тривалим процесом, до того ж на результати якого впливають фактори, які важко врахувати (метеоумови, стан дорожнього покриття, характер, стиль та досвід водія тощо).

4. Запропоновано ввести нові категорії: відносна густина $\Delta\rho$, відносна нижча теплота згорання ΔH_u біодомішки та відносна теоретично необхідна кількість повітря для згорання 1 кг ΔL_0 домішки в біопаливі, які дають можливість сформулювати умову зменшення витрати біопалив двигуном внутрішнього згорання автомобільного транспортного засобу, порівнювати та обирати біопалива з різними домішками різних об’ємних концентрацій з погляду зміни їх витрат, встановлювати норми витрат рідких біопалив залежно від об’ємної концентрації відомої за вказаними властивостями біодомішки в паливі.

5. Запропоновано концепцію нового методу розрахунку показників паливної економічності автомобіля контролем витрат рідких біопалив та розроблено його структурно-логічну схему для визначення та контролю витрат біопалив автомобільним транспортним засобом, що має відомі конструктивні параметри та рухається у відомих умовах на відомих режимах. Концепція методу полягає у визначенні та використанні запропонованого коефіцієнта зміни витрат біопалив, який враховує зміну густини, нижчої теплоти згорання та теоретично необхідної кількості повітря для згорання 1 кг біопалива залежно від об’ємної концентрації біологічної складової в ньому, що дає можливість нормування та контролю витрат біопалив в процесі експлуатації автомобіля. Проаналізовано взаємозв’язок в елементах запропонованій структурно-логічній схемі між параметрами умов,

режиму руху, конструкції автомобіля та властивостей біопалив з різною об’ємною концентрацією біологічної складової, що дозволяє покращити систему контролю витрат біопалив та підвищити ефективність його використання в процесі експлуатації автотранспортних засобів.

6. Встановлено, що у разі збільшення концентрації біодомішок в паливі (бензині або дизельному) збільшення його витрат автотранспортним засобом відбувається, в основному, за рахунок зменшення енергетичної складовой біопалива. Однак всі проаналізовані альтернативні домішки до бензину та дизельного палива призводять до збільшення витрати палив зі зростанням концентрацій домішок.

7. Встановлено, що, з погляду зміни витрати біопалива, більш привабливою для автотранспортних засобів з дизельними двигунами є дизельні палива з домішками ріпакової олії, оскільки вона має найменше значення коефіцієнта зміни витрат біопалив. Для бензинових двигунів у випадку використання за паливо лише біоетанолу потрібно очікувати збільшення його витрати на 63%.

8. Отримано числові значення номінальної питомої витрати палива бензинових з іскровим запалюванням і дизельних (з нерозділеними камерами згорання, вихрокамерні та передкамерні) двигунів, що працюють на біопаливах з різним вмістом домішок (біоетанол, ріпакова олія), які потрібно враховувати для вибору діапазону вимірювання та контролю витрат біопалив.

9. Запропоновано новий критерій оцінювання зміни витрати біопалива, що дозволяє в процесі екплуатації автотранспортного засобу аналізувати та порівнювати між собою біопалива з різною об’ємною концентрацією різних біологічних складових: зменшення витрати відбувається, якщо значення $\Delta\rho+\Delta L_0+\Delta H_H$ від’ємне, а кількісне значення витрати біопалива залежить від концентрації

домішки та визначається запропонованим коефіцієнтом зміни витрати.

Доведено, що найбільш привабливими, з погляду витрат біопалив, автотранспортним засобом є домішки, що мають більшу, порівняно з „основним” паливом, густину, нижчу теплоту згорання та теоретично необхідну кількість повітря для згорання 1 кг.

10. Проведено аналітичний огляд методів вимірювання витрат рідин і конструкцій існуючих витратомірів, розглянуто їх класифікацію, переваги та недоліки й сформульовано основні вимоги до витратомірів палив. Показано, що найбільш привабливими (щодо використання для автотранспорних засобів) є термоанемометричні витратоміри, але і вони потребують удосконалення та адаптації для вимірювання витрат біопалив на автомобільному транспорті.

11. Проаналізовано існуючу математичну модель температурного поля в потоці біопалива, що проходить через термоанемометричний витратомір. Розроблено математичну модель визначення радіального теплового потоку в трубці термоанемометричного витратоміра з циліндричною стінкою (лінійна густина теплового потоку), в яку введено нові категорії, а саме: конструктивний коефіцієнт і коефіцієнт радіальної теплопровідності трубки термоанемометричного витратоміра. Проаналізовано їх вплив на величину радіального теплового потоку. Показано шляхи підвищення чутливості термоанемометричного витратоміра, підвищення точності вимірювання витрат, що полягають у взаємному врахуванні конструктивних параметрів термоанемометричного витратоміра та властивостей біопалива.

12. Для підвищення точності вимірювання витрат біопалив термоанемометричним витратоміром обгрунтовано необхідність врахування теплопровідності палива та матеріалу трубки термоанемометричного витратоміра, зменшення діаметра

нагрівального елемента та збільшення діаметра трубки термоанемометричного витратоміра, а також кількість термоперетворювачів в потоці різних біопалив. Отримано залежності відношення діаметра трубки до діаметра нагрівального елемента термоанемометричного витратомріа для матеріалів трубки різної теплопровідності, використання яких дозволяє зменшити вплив радіального теплового потоку на осьовий, що дасть зменшення похибки вимірювання витрат біопалив.

13. Отримано нову математичну модель розподілу температурного поля вздовж трубки витратоміра та вираховано уточнене значення витрати біопалива. Запропоновано методи підвищення точності та швидкодії теплового витратоміра на основі використання сучасних спеціалізованих нейропроцесорів, які дозволяють компенсувати вплив випадкових і динамічних похибок вимірювання витрат біопалив.

14. Доведено, що для зменшення похибки вимірювання витрати палива автотранспортного засобу потрібно зменшувати вплив радіального теплового потоку в термоанемометричному витратомірі на осьовий тепловий потік, а також зменшувати діаметр нагрівального елемента та збільшувати діаметр трубки термоанемометричного витратоміра.

15. Отримано залежності відношення діаметра трубки до діаметра нагрівального елемента термоанемометричного витратоміра для матеріалів трубки різної теплопровідності, що дозволяє зменшити вплив радіального теплового потоку на осьовий і зменшити похибку вимірювання витрати палива.

16. Рекомендовано проведення додаткового дослідження роботи термоанемометричного витратоміра з нагрівальним елементом плоскої спіральної форми, оскільки, ймовірно, запропонована форма нагрівального елемента зробить радіальний тепловий потік більш

рівномірним, що зменшить його вплив на осьовий тепловий потік і, відповідно, на похибку вимірювання витрат біопалив.

17. Проведено оцінювання якості, можливих похибок та невизначеності вимірювання витрат біопалив термоанемометричним витратоміром. Зазначено, що розбіжність результатів, отриманих експериментально, і комп'ютерним моделюванням можлива внаслідок різних фізико-хімічних властивостей (теплопровідність, в'язкість, густина тощо) палива і його властивостей, що задаються в комп'ютерній моделі.

18. Аналіз існуючих конструкцій та принципу дії термоанемометричних витратомірів дозволяє стверджувати, що вони найбільш відповідають вимогам щодо можливості їх використання на транспорті, зокрема для вимірювання витрат біопалив з альтернативної сировини. Для покращення їх функціональних можливостей розроблено:

- високоточний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірюваної інформації, який дозволяє за умови корекції динамічних похибок та врахування поточних значень фізико-хімічних властивостей палива підвищити точність вимірювання витрат палив у 1,5 ..., 1,8 раза;

- калориметричний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірюваної інформації, який дозволяє автоматизувати процес та підвищити точність вимірювання витрат палив в 1,2–1,4 раза за рахунок введення блоків логарифмування, лінійної апроксимації, обчислення витрати палива, термоперетворювача, що розміщений у потоці палива поза зоною дії нагрівального елемента прототипу, та двох груп термоперетворювачів, які розташовані по різні боки від нагрівального елемента прототипу, причому термоперетворювачі в цих групах розміщені послідовно на заданих відстанях від даного нагрівального елемента;

- два калориметричних витратоміри моторного палива з підвищеною точністю вимірів, які здатні зменшувати похибку, порівняно з прототипом, на 7–19% завдяки введенню блока керування температурою, вхідного нагріву прямого та зворотного потоків палива, що забезпечує можливість регулювання температури палива на входах трубок прямого та зворотного потоків палива, а також завдяки введеній компенсації температурної похибки, похибки сили тяжіння, струмопідведення та в'язкого тертя. Запропоновані витратоміри здатні інтегруватись у всі сучасні системи живлення двигунів внутрішнього згорання зі зворотним зливанням палива в бак.

19. Розроблено спосіб розширення діапазону вимірювання витрат палив термоанемометричним витратоміром. Він полягає у використанні послідовно встановлених секцій з певним співвідношенням діаметрів, що дає можливість змінювати швидкість потоку палива крізь витратомір в декілька разів. Запропоновано новий алгоритм обробки сигналів в багатосекційному термоанемометричному виратомірі, що підвищує інформативність процесу вимірювання витрат біопалив: для отримання розподілу температур в потоці палива максимальної інформативності (з найбільшою різницею між сусідніми термоперетворювачами), тобто для зменшення похибки вимірювання вират палив треба вибирати для аналізу температур саме ту трубку багатосекційного витратоміра, де він наближається до вигляду, коли сума різниць температур між всіма сусідніми термоперетворювачами трубки витратоміра максимальна.

20. Запропоновано шляхи удосконалення процесу вимірювання витрат біопалив двигуном внутрішнього згорання за допомогою термоанемометричного виратоміра, що полягають у:

- виборі розмірів і кількості трубок багатосекційного витратоміра, їх матеріалу, кількості термоперетворювачів і місць їх встановлення

(ззовні, перед нагрівальним елементом, на нагрівальному елементі, в потоці палива після нагрівального елемента);

- зменшенням впливу з'єднювальних конусів трубок багатосекційного теплового витратоміра на рух потоку палива задля уникнення місцевих завихрювань і їх впливу на сумарне температурне поле;

- правильному виборі типів, конструкцій і розмірів нагрівачів теплового витратоміра, які мають бути узгоджені з розмірами трубок та матеріалами, з яких вони виготовлені;

- врахуванні значень температур нагріву палив залежно від їх типу і концентрації біологічної складової в них.

21. Впровадження біопалив на ринку України є перспективним шляхом зменшення залежності країни від викопного палива, що є дуже актуальним як у період воєнного стану, так і в часи післявоєнного відновлення України.

Шляхом оцінювання переваг та недоліків застосування біопалив, а саме: дизельного палива з додаванням олії ріпаку, встановлено значне домінування переваг над недоліками, що дозволяє рекомендувати такий вид біопалива як одну з альтернатив викопному паливу. Подальшого дослідження потребує економічне обґрунтування переведення автотранспортних засобів на використання різних видів біопалив.

ІІ. Комп'ютерне моделювання

1. Отримано залежності температур біопалив по осі трубки теплового витратоміра з урахуванням їх витрат від відстані до нагрівального елемента. Встановлено, що, з метою підвищення точності вимірювань та чутливості термоанемометричного витратоміра, для різних витрат біопалив він має мати такі геометричні параметри: відношення внутрішнього діаметра трубки до діаметра нагрівального елемента $d_2/d_1=3/2$. Вимірювання витрат палив доцільно виконувати на відстані

1…7 см від нагрівального елемента по осі трубки витратоміра для автотранспортних засобів, що працюють на біопаливах з відносно невеликим значенням динамічної в’язкості.

2. Проведено моделювання теплового потоку в трубці термоанемометричного витратоміра та отримано залежності температур від відстані до нагрівального елемента по осі трубки витратоміра для різного вмісту олій рослинного походження в дизельному паливі в діапазоні витрат 5–25 л/год. Отримано залежності температур дизельного палива, олії рослинного походження та різних об’ємних концентрацій олій в дизельному паливі по осі трубки термоанемометричного витратоміра, на основі яких можна визначати витрати вказаних біопалив.

3. Наведено результати комп’ютерного моделювання теплового потоку в термоанемометричному витратомірі з послідовно встановленими трубками довжиною 5 см діаметрами 10, 30, 50 см, відповідно. Моделювання проведено для витрат 100 л/год та 200 л/год. Отримано графічний розподіл швидкостей і температур потоків в певних перетинах теплового витратоміра за умов: температура навколишнього середовища 20 °С, температура рідини на вході 10 та 30 °С.

4. Проведено моделювання теплового балансу нагрівального елемента в рухомому потоці біопалива для ідентифікації основних параметрів математичної моделі, від яких залежить точність і швидкодія термоанемометричного витратоміра. Аналіз результатів показав, що для підвищення точності вимірювання витрат біопалив термоанемометричним витратоміром слід одночасно вимірювати температуру палива у відповідних точках потоку. Отримано графічне подання розподілу температур в потоці різних палив для різних їх швидкостей руху (витрат).

III. Експериментальні дослідження

1. Експериментально доведено, що час виходу термоанемометричного витратоміра на робочий температурний режим для різних струмів, що проходять через нагрівальний елемент, та різних концентрацій ріпакової олії в дизельному паливі, залежно від вмісту ріпакової олії в дизельному паливі, змінюється в 9,3 раза, що потрібно враховувати в алгоритмі роботи термоанемометричного витратоміра для підвищення точності вимірювання витрат біопалив.

2. Вимірюваннями витрат палив на маршруті руху автотранспортного засобу встановлено, що:

- розроблений термоанемометричний витратомір здатний працювати в умовах руху автотранспортного засобу з необхідним рівнем надійності, його використання є можливим і потребує додаткових досліджень робота термоанемометричного витратоміра в більш широкому діапазоні дорожніх і транспортних умов експлуатації автотранспортних засобів;

- відносна похибка вимірювання витрат палив на маршруті руху автомобіля Citroen Berlingo з дизельним двигуном об’ємом 1,9 л, що визначено за допомогою термоанемометричного витратоміра та об’ємним способом, на маршруті протяжністю 1,2 км склала 2,8%;

- діаметр нагрівального елемента в трубці тероманемометричного витратоміра впливає на похибку вимірювання витрат палив, а його зменшення дозволяє знизити цю похибку в 1,2–1,6 раза.

3. На стенді з біговими барабанами встановлено числові значення витрат біопалив на основі дизельного палива з домішками ріпакової олії за об’ємом 15 та 30% автомобілем ГАЗ-33060 в діапазоні швидкостей 65–95 км/год;

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна одержаних результатів полягає в узагальненні

та поглибленні наукових основ та у розробці нового методу розрахунку параметрів управління паливною економічністю автомобілів, що дозволяє враховувати зміну фізико-хімічних властивостей біопалив залежно від концентрації біологічної складової (біодомішки) в них, зокрема:

• вперше:

- науково обґрунтовано і експериментально підтверджено доцільність введення нових категорій: відносної густини біодомішки, відносної нижчої теплоти згорання біодомішки та відносної теоретичної необхідної кількості повітря для згорання 1 кг біодомішки, що дає змогу підвищити точність контролю витрат біопалив;

- запропоновано нові підходи і розроблений метод оцінювання зміни густини, нижчої теплоти згорання та теоретично необхідної кількості повітря для згорання 1 кг домішки залежно від витрати палива автомобіля, що працює на бензині (або дизельному паливі) та витратою палива автомобіля, що працює на біопаливі з відомою об’ємною концентрацією біологічної складової;

- встановлено взаємозв’язок фізико-хімічних показників біопалив з відомою об’ємною концентрацією та відомою за властивостями біодомішки і умовою зменшення витрати біопалива автомобіля, який дозволяє покращити його показники ефективності експлуатації.

• удосконалено:

- науковий напрям моделювання розподілу температур в потоці палива термоанемометричного виратоміра введенням коефіцієнтів, які враховують його конструктивні параметри та фізико-хімічні властивості біопалив. Запропонований метод відрізняється від існуючих можливістю зменшення випадкових і динамічних похибок вимірювання та контролю витрат біопалив використанням сучасних спеціалізованих нейропроцесорів.

• отримали подальший розвиток:

- метод визначення теплового потоку в трубці термоанемометричного витратоміра з урахуванням його конструктивних параметрів (відношення діаметра трубки до діаметра нагрівального елемента, матеріалу трубки та радіальної теплопровідності термоанемометричного витратоміра, що відрізняється від існуючих можливостю вибору параметрів конструктивних елементів, які зменшують похибку вимірювання та контролю витрат біопалив;
- метод прогнозування раціональних конструктивних параметрів термоанемомертичного витратоміра, якій відрізняється від існуючих варіюванням послідовно встановлених трубок різних діаметрів, що підбираються певним чином, й одночасним аналізом умов їх роботи. Такий підхід дозволяє отримати підвищення точності і швидкодії вимірювання та контролю витрат біопалив, розширює діапазон вимірювання витрат та функціональні можливості термоанемометричних витратомірів щодо автоматизації процесу вимірювання та контролю.

Достовірність отриманих результатів забезпечено використанням обгрунтованих методик та засобами числового моделювання, узгодженням розрахунків, що отримано різними методами, відповідністю результатів експериментальних даних теоретичним розрахункам, одержаних автором особисто, з даними інших дослідників.

Практичне значення одержаних результатів

Практична цінність наведених у роботі результатів визначається її спрямованістю на поліпшення ефективності експлуатації автотранспортних засобів через підвищення точності та швидкості вимірювання й контролю витрат біопалив. Практичними результатами є:

1. Розроблено метод врахування біологічної складової в біопаливі, що дозволяє, з урахуванням її концентрації, визначати витрату біопалива автомобіля, який має відомі конструктивні параметри та рухається на відомих режимах у відомих умовах;

2. Доопрацьована конструкція термоанемометричного витратоміра шляхом використання нових елементів: зовнішнього термоперетворювача, нейропроцесора з блоком перемикачів та ЕОМ, блоків логарифмування, лінійної апроксимації та обчислення витрати, груп термоперетворювачів по різні боки від нагрівального елемента, нагрівального елемента на вході в термоанемометричний витратомір з блоком керування температури, трубки зворотного потоку палива з блоком віднімання, послідовно встановлених трубок різних діаметрів, що підбираються певним чином з одночасним аналізом їх роботи, що забезпечує підвищення точності і швидкодії вимірювання та контролю витрат біопалив, розширення діапазону вимірювання витрат, номенклатури палив і функціональних можливостей термоанемометричного витратоміра щодо автоматизації вимірювання та контролю;

3. Новизну та практичну цінність пропонованих технічних рішень підтверджено 4 патентами на винаходи, 2 свідоцтвами про реєстрацію авторського права на твір, використання змісту яких дозволяє розв’язувати задачі вимірювання та контролю витрат біопалив з підвищеною точністю та швидкодією, забезпечує розширення функціональних можливостей термоанемометричного витратоміра.

Методи дослідження

Розрахунково-аналітичним методом:

- за допомогою удосконаленої математичної моделі зміни витрат біопалив (на основі бензину з домішками етилового спирту; на основі дизельного палива з домішками олій рослинного походження)

двигуном внутрішнього згорання автотранспортного засобу, яка дозволяє встановлювати основні та додаткові норми витрат палив у разі використання бензинів з домішками біоетанолу різних концентрацій або дизельного палива з домішками олій рослинного походження в реальних умовах експлуатації автотранспортних засобів, *встановлено*, що у разі збільшення концентрації домішок в паливі (бензині або дизельному) збільшення витрати біопалива відбувається, загалом, за рахунок зменшення енергетичної складової палива, водночас всі проаналізовані біодомішки до основного палива (бензину та дизельного) збільшують витрату біопалива двигуном автотранспортного засобу зі збільшенням їх концентрацій, що необхідно враховувати, вибираючи характеристики засобів контролю витрат;

- на основі введених категорій (відносна густина $\Delta\rho$, відносна нижча теплота згорання ΔH_u та відносна теоретично необхідна кількість повітря для згорання 1 кг домішки ΔL_0) *сформульовано* критерій витрати двокомпонентного палива як суми цих характеристик. *Доведено*, що, в кращому випадку, потрібно використовувати домішки, що мають більшу, відносно основного палива, густину, нижчу теплоту згорання та теоретично необхідну кількість повітря для згоряння 1 кг. *Запропоновано* критерій зміни витрати палива, який використовують так: зменшення витрати двокомпонентного палива відбувається у випадку від'ємного значення критерію витрати палива $\Delta\rho+\Delta L_0+\Delta H_H$. Кількісне значення витрати палива залежить від концентрації домішки та визначається запропонованим коефіцієнтом зміни витрати. Такі характеристики дозволяють аналізувати і вибирати потрібний діапазон вимірювання та контролю витрат біопалив;

- *отримано* аналітичні залежності відношення діаметра трубки до діаметра нагрівального елемента термоанемометричного витратоміра

для різних матеріалів трубки, які дозволяють аналізувати вплив радіального теплового потоку на осьовий та відповідно – зменшити похибку вимірювання витрати палива. *Запропоновано* для зменшення похибки вимірювання витрати палива внаслідок зменшення впливу радіального теплового потоку в термоанемометричному витратомірі на осьовий тепловий потік (без врахування теплопровідності палива та матеріалу трубки витратоміра) потрібно зменшувати діаметр нагрівальнго елемента та збільшувати діаметр трубки термоанемометричного витратоміра, а з метою підвищення чутливості термоанемометричного витратоміра доцільно використовувати кількість термоперетворювачів, яка залежить від величини витрати палива;

- *проаналізовано* існуючу математичну модель температурного поля в потоці біопалива, що проходить через витратомір, для визначення основних її складових елементів. *Розроблено* математичну модель визначення радіальної теплопровідності термоанемометричного витратоміра з циліндричною стінкою, в яку *введено* категорії конструктивного коефіцієнта і коефіцієнта радіального теплового потоку термоанемометричного витратоміра. *Проаналізовано* їх вплив на величину радіального теплового потоку. *Показано*, що зміна радіального теплового потоку в трубці термоанемометричного витратоміра залежить від добутку коефіцієнта радіальної теплопровідності, конструктивного коефіцієнта та різниці температур між зовнішньою поверхнею трубки термоанемометричного витратоміра та нагрівального елемента, причому діаметр внутрішньої поверхні трубки не впливає на величину радіального теплового потоку;

- *проведено* моделювання теплового балансу нагрівального елемента в рухомому потоці палива через термоанемометричний витратомір для ідентифікації основних параметрів математичної моделі, від яких

залежить точність і швидкодія тероманемометричного витратоміра. Аналіз результатів показав, що для підвищення точності вимірювання витрат палив термоанемометричним витратоміром слід одночасно вимірювати температуру палива у відповідних точках потоку. *Отримано* графічне подання розподілу температур в потоці різних палив для різних їх швидкостей руху (витрат);

- *отримано* математичну модель розподілу температурного поля вздовж трубки термоанемометричного витратоміра та *вираховано* уточнене значення витрати біопалива. *Запропоновано* методи підвищення точності та швидкодії термоанемометричного витратоміра на основі використання сучасних спеціалізованих нейропроцесорів, які дозволяють компенсувати вплив випадкових і динамічних похибок вимірювання витрат біопалив;

- *отримано* спрощене рівняння радіального теплового потоку дво- і багатокомпенентного палива в трубці термоанемометричного витратоміра. *Показано*, що значення коефіцієнта радіальної тепловпровідності трубки термоанемометричного витратоміра для сумішевих палив дорівнює значенню теплопровідності самого палива. *Запропоновано* зміну температури вздовж осі трубки термоанемометричного витратоміра подавати у вигляді лінійних залежностей від відстані до нагрівального елемента термоанемометричного витратоміра;

- *отримано* залежності температур біопалив по осі трубки термоанемометричного витратоміра з урахуванням їх витрат від відстані до нагрівального елемента. *Встановлено*, що підвищення точності вимірювань та чутливості термоанемометричного витратоміра для бензину, дизельного палива, біоетанолу, олії рослинного походження і різних їх витрат двигуном автотранспортного засобу відбувається, коли він має відношення

внутрішнього діаметра трубки до діаметра нагрівального елемента d_2/d_1=3/2;

- *отримано* залежності відношення діаметра трубки до діаметра нагрівального елемента термоанемометричного витратоміра для матеріалів трубки різної теплопровідності, що дозволяє зменшити вплив радіального теплового потоку на осьовий і дасть, зрештою, зменшення похибки вимірювання витрат палив. *Доведено*, що для зменшення похибки вимірювання внаслідок зменшення впливу радіального теплового потоку в термоанемометричному витратомірі на осьовий тепловий потік потрібно зменшувати діаметр нагрівального елемента та збільшувати діаметр трубки термоанемометричного витратоміра (без урахування теплопровідності палива та матеріалу трубки);

- *проведено* оцінювання якості, можливих похибок та невизначеності вимірювання витрат біопалив тепловим витратоміром. *Зазначено*, що розбіжність результатів, отриманих експериментально, і комп'ютерним моделюванням можлива внаслідок різних фізико-хімічних властивостей (теплопровідність, в'язкість, густина тощо) палива і його властивостей, що задаються в комп'ютерній моделі.

Методом числового ком'ютерного моделювання:

- *проведено* моделювання теплового потоку в трубці термоанемометричного витратоміра та *отримано* залежності температур від відстані до нагрівального елемента по осі трубки витратоміра для різного вмісту олії рослинного походження в дизельному паливі в діапазоні витрат 5–25 л/год;

- *отримано* залежності температур біоетанолу, бензину, дизельного палива, олії рослинного походження в трубці термоанемометричного витратоміра від відстані до нагрівального елемента з діаметрами 2, 3, 4 мм в діапазоні витрат 5–25 л/год, які дозволяють визначати числові значення витрат цих палив;

- *отримано* залежності температур дизельного палива, олії рослинного походження та різних об’ємних концентрацій олій рослинного походження в дизельному паливі по осі трубки термоанемометричного витратоміра, на основі яких можна визначати витрати вказаних палив в діапазоні від 5 до 25 л/год;
- *отримано* графічний розподіл швидкостей та температур теплового потоку в трубці трисекційного термоанемометричного витратоміра з послідовно встановленими трубками довжиною 5 см діаметрами 10, 30, 50 см, відповідно. Моделювання проведено для витрат 100 л/год та 200 л/год, температура навколишнього середовища 20 °С, температура палив на вході 10 та 30 °С.

Експериментальним методом:
- *встановлено* залежності часу виходу термоанемометричного витратоміра на робочий температурний режим для струмів через нагрівальний елемент 0,024, …, 0,12 А та концентрацій ріпакової олії в дизельному паливі 0…100%. *Доведено*, що час виходу термоанемометричного витратоміра на робочий режим для різних струмів, що проходять через нагрівальний елемент з ніхрому, та різних концентрацій ріпакової олії в дизельному паливі змінюється в 9,3 раза залежно від величини струму, що проходить через нагрівальний елемент, та об’ємного вмісту ріпакової олії в паливі, що потрібно враховувати для побудови алгоритму роботи витратоміра;
- встановлено, що розроблений термоанемометричнмй витратомір здатний працювати в умовах руху автотранспортного засобу з необхідним рівнем надійності, використання його на автотранспортних засобах є можливим; потребує додаткових досліджень робота термоанемометричного витратоміра в більш широкому діапазоні дорожніх і транспортних умов експлуатації автотранспортних засобів;

- *визначено*, що відносна похибка вимірювання витрат палив на маршруті руху автомобіля Citroen Berlingo з дизельним двигуном об’ємом 1,9 л, яку визначено за допомогою термоанемометричного витратоміра та об’ємним способом, на десяти заїздах в прямому та десяти заїздах в зворотному напрямках на маршрути протяжністю 1,2 км склала 2,8%;

- *встановлено* вплив діаметра нагрівального елемента термоанемометричного витратоміра на похибку вимірювання витрати палива автомобіля Сітроєн Berlingo. *Доведено*, що діаметр нагрівального елемента в трубці термоанемометричного витратоміра впливає на похибку вимірювання витрат палив, а його зменшення дозволяє знизити цю похибку в 1,2–1,6 раза;

- на стенді з біговими барабанами *отримано* числові значення витрат біопалив з домішками 15 та 30% за об’ємом ріпакової олії для автомобіля ГАЗ-33060, що дозволило перевірити адекватність розробленого методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем витрат рідких біопалив;

- за допомогою термоанемометричного витратоміра *отримано* показники витрати палива легкового автомобіля Сітроєн Berlingo на маршруті руху;

- *отримано* висновок про необхідність проведення додаткового дослідження термоанемометричного витратоміра з нагрівальним елементом плоскої спіральної форми, оскільки, ймовірно, запропонована форма нагрівального елемента зробить радіальний тепловий потік більш рівномірним, що зменшить його вплив на осьовий тепловий потік і, відповідно, на похибку вимірювання та контролю витрат біопалив за допомогою термоанемометричного витратоміра.

Впровадження результатів дослідження:

- Департамент регіонального розвитку Житомирської обласної державної адміністрації та Житомирської обласної військової адміністрації;
- Державне підприємство «ДержавтотрансНДІпроект»;
- Державне підприємство «Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних та управляючих систем» (ДП НДІ «Система»);
- United Science and Capital AB (Halmstad, Sweden);
- підприємство з іноземними інвестиціями ТОВ «Danico» (Житомирська обл., Україна);
- у навчальний процес Поліського національного університету (м. Житомир) у процесі підготовки курсів «Використання техніки в агропромисловому комплексі», «Трактори і автомобілі».

Ключові слова: автомобіль, альтернативне паливо, бензин, біопаливо, біодомішка, відпрацьовані (вихлопні) гази, витрата палива, витратомір, двигун, двигун внутрішнього згорання, дизельний двигун, дизельне паливо, екологічні показники, паливо, паливна економічність, похибка вимірювання, транспортний засіб.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових фахових виданнях України.

1. Ільченко А. В., Колодницька Р.В., Кур’ята В.П. Вплив добавок рослинних олій на вміст сажі у відпрацьованих газах двигуна автомобіля. Вісник СНУ ім. Даля. Луганск, 2005. № 6(88). С. 225–229.
2. Ільченко А. В., Кур’ята В.П. Математична модель відкладання сажі у випускному тракті двигуна автомобіля. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2006. № 3(38). С. 20–24.

3. Ільченко А.В., Кур’ята В.П. Вплив домішок рослинних олій до дизельного палива на димність відпрацьованих газів двигуна. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2007. № 1(40). С. 29–34.

4. Ільченко А. В. Теоретичні основи нормування витрат моторних палив з високооктановими кисневмісними добавками. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2004. № 1(28). С. 32–38.

5. Грабар І. Г., Ільченко А. В., Колодницька Р. В. Зміна витрати моторних палив з добавками ріпакової олії. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2004. № II(29). С. 19-23.

6. Ільченко А.В., Безвесільна О.М., Тростенюк Ю.В. Передача тепла в термоанемометричному витратомірі біопалив. *Вісник Східноєвропейський журнал передових технологій*. Харків, 2014. С. 47–51. doi:10.15587/1729-4061.2014.28638

7. Ільченко А. В. Теоретичні передумови зменшення витрат двокомпонентних моторних палив. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2004. № 4(31). С. 1–8.

8. Ільченко А. В., Кур’ята В. П. Математична модель витрати палива автомобіля з урахуванням збіднення паливо-повітряної суміші (на прикладі моторних палив з домішками олій рослинного походження). *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2005. № 1(32). С. 15–19.

9. Ільченко А. В. Колодницька Р. В., Кур’ята В. П. Експериментальні дослідження зміни витрат моторних палив з добавками ріпакової олії. *Автомобільний транспорт. Збірник наукових праць*. Харків, 2005. № 16. С. 267–269.

10. Ільченко А. В., Романова А. О. Урахування властивостей двокомпонентних палив у процесі вимірювання їх витрати термоанемометричним витратоміром. *Вісті автомобільно-дорожнього інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет».* Донецьк, 2007. № 1(4). С. 106–109.

11. Грабар І. Г., Ільченко А. В., Кришевський М. Б., Кур'ята В. П. Експериментальні дослідження провідності палива БІО-100 з метою створення системи контролю його якості. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наукових праць*. Житомир, 2007. Випуск 5. ч. 1. С. 151–157.

12. Ільченко А. В. Обгрунтування вибору моторних біопалив за умови зменшення їх витрат двигуном автомобіля. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2008. № 2(45). С. 32–36.

13. Ільченко А. В. Перспективи застосування біодизельного палива в автомобільних двигунах. *Вісник НТУ*. Київ, 2013. № 27. С. 370–373.

14. Безвесільна О. М., Ільченко А. В., Ткачук А. Г., Пархоменко С. О. Методи вимірювання витрат рідини та конструкції витратомірів. *Вісник Інженерної академії України*. 2013. № 3–4. С. 216–222.

15. Ільченко А. В., Безвесільна О. М., Тростенюк Ю. В. Зміна радіального теплового потоку термоанемометричного витратоміра біопалив двигуна внутрішнього згоряння. *Вісник НТУ*. Київ, 2013. № 28. С. 186–191.

16. Тростенюк Ю. В., Безвесільна О. М., Ільченко А. В. Моделювання осьового теплового потоку трубки термоанемометричного витратоміра біопалив. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки».* Луцьк, 2014. № 46. С. 538–545.

17. Ільченко А.В., Тростенюк Ю.В., Тростенюк Ю.І. Моделювання осьового теплового потоку термоанемометричного витратоміра в залежності від вмісту олій рослинного походження в дизельному паливі. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал*. Луцьк, 2014. № 2. С. 61–67.

18. Ільченко А. В. Вплив деяких параметрів конструкції теплового витратоміра палива на передачу тепла в ньому. *Вісник машинобудування та транспорту ВНТУ*. Вінниця, 2021. Том 13. № 1. С. 54–59.

19. Ільченко А. В., Багінський О. О. Шляхи зменшення похибки вимірювання витрат палив тепловим витратоміром. *Технічна інженерія. Державний університет «Житомирська політехніка»*. Житомир, 2023. № 1 (91). С. 207–213.

20. Ільченко А. В. Методологічні основи визначення і контролю витрат біопалив в процесі руху автомобіля. *Вісник машинобудування та транспорту ВНТУ*. Вінниця, 2024. № 1 (19). С. 61–67. DOI: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-61-67

21. Замула І. В., Ільченко А. В., Травін В. В. Економічні перспективи використання біопалива в контексті реалізації концепції сталого розвитку. *Ефективна економіка*. 2024. № 11. DOI: http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.11.8

Публікацій у періодичних наукових виданнях, що внесені до наукометричних баз

22. Ilchenko, A., Bezvesilna, E. Development of calorimetric motor fuel flowmeter with increased metering accuracy by adjusting the inlet temperature. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014, 6(7). p. 50–54. (Scopus, Q3)

23. Korobiichuk, I., Bezvesilna O., Ilchenko A., … Nowicki M., Szewczyk R. Calorimetric flow meter of motor fuel with inlet temperature regulation. *4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies*. 2017. p. 975–979. (Scopus, Q3)

24. Bezvesilna O., Kamiński M., Ilchenko A. Heat transfer in the thermo-anemometric flowmeter for biofuels. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. p. 505-511. (Scopus, Q4)

25. Korobiichuk I., Bezvesilna O., Ilchenko A., Trostenyuk Y. Thermoanemometric flowmeter of biofuels for motor transport. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. p. 443-448. (Scopus, Q4)

26. Korobiichuk I., Bezvesilna O., Ilchenko A., ...Nowicki M., Szewczyk R. A mathematical model of the thermo-anemometric flowmeter. *Sensors.* Switzerland, 2015. 15(9). p. 22899–22913. (Scopus, Q1)

27. Korobiichuk I., Ilchenko A. Optimal Design Parameters of Thermal Flowmeter for Fuel Flow Measurement. *Sensors.* 2022. 8882. doi.org/10.3390/s22228882. (Scopus, Q1)

28. Ilchenko A., Korobiichuk I. Methods of Reduction of Fuel Consumption Measurement Error by Thermo-Anemometric Flow Meter. Automation 2024: Advances in Automation, Robotics and Measurement Techniques. AUTOMATION 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1219. *Springer, Cham.* https://doi.org/10.1007/978-3-031-78266-4_27 (Scopus)

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав

29. Ільченко А. В. Багінський О. О. Вибір конструкції та принципу дії витратомірів для їх використання на транспортних засобах. *Modern engineering and innovative technologies*. Німеччина, 2021. Випуск № 17. С. 54–62, DOI: 10.30890/2567-5273.2021-17-02-065

30. Ільченко А. В. Аналіз зміни чутливості термоанемометричного витратоміра біопалив. *SWorldJournal*. Болгарія, 2024. № 24. С. 151–160. DOI: 10.30888/2663-5712.2024-24-00-056

Патенти на винаходи

31. Безвесільна О.М., Подчашенський Ю.О., Ільченко А.В., Шавурський Ю.О. Високоточний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації: пат. 91160 Україна: МПК 2009 G01F1/68, G01F1/696, F02M5/00. № 200906515; заявл. 22.06.09; опубл. 26.06.10, Бюл. № 12. 4 с.

32. Безвесільна О.М., Ільченко А.В., Подчашенський Ю.О., Шавурський Ю.О. Калориметричний витратомір моторного палива з

цифровою обробкою вимірювальної інформації: пат. 90985 Україна: МПК 2009 F02M5/00. № 200910565; заявл. 19.10.09; опубл. 10.06.10, Бюл. № 11. 4 с.

33. Безвесільна О.М., Ільченко А.В. Калориметричний витратомір моторного палива з підвищеною точністю вимірів: пат. 106858 Україна: МПК 2014.01 F02M5/00, G01F1/68, G01F1/696, G01F15/00. № 201314550; заявл. 12.12.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 19. 4 с.

34. Безвесільна О.М., Ільченко А.В., Тростенюк Ю.О. Калориметричний витратомір моторного палива з підвищеною точністю вимірів: пат. 106950 Україна: МПК 014.01 F02M5/00, G01F1/68. № 201313387; заявл. 18.11.13; опубл. 27.10.14., Бюл. № 20. 8 с.

Публікації апробаційного характеру

35. Ільченко А. В. Особливості процесу вимірювання витрат біопалив багатосекційним термоанемометричним витратоміром. *Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури*: Автошляховик України. Збірка тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2023. С. 273–276.

36. Ільченко А. В., Кур'ята В. П. Етанол як третя компонента при використанні дизельних палив з домішками олій рослинного походження. *XXXI Науково-практична міжвузівська конференція, присвячена Дню університету*. Житомир, 2006. С. 20.

37. Kolodnitcka R., Ilchenko A. An investigation of droplet mean diameters and fuel consumption for straight vegetable oil. *Mechanics 2006* : Proceedings of the International Scientific Conferens. Rzeszow University of Technology. 2006. № 231. P. 95–102.

38. Ільченко А. В., Колодницька Р. В. Аналіз моделей викидів сажі, оксидів азоту та витрати палив у застосуванні до біопалив у дизелях. *Практична космонавтика і високі технології*: тези VI науково-

практичної конференції, присвяченої 100–річчю з дня народження академіка С. П. Королева. Житомир, 2007. С. 83.

39. Ільченко А. В. Зміна чутливості термоанемометричного витратоміра біопалива. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. Вінниця, 2024. С. 124-125.

40. Безвесільна О.М., Ільченко А.В., Тростенюк Ю.В. Програмно-апаратний комплекс для вимірювання витрат моторних біопалив термоанемометричним методом. *Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки*. Житомир, 10-12 травня 2017 р. https://conf.ztu.edu.ua/tezy-do-dnya-nauky-10-12-travnya-2017-r/

41. Колодницька Р. В., Ільченко А. В. Зв'язок між коефіцієнтом та критерієм зміни витрат двокомпонентних палив для двигунів внутрішнього згоряння. *XXXIII Науково-практична міжвузівська конференція, присвяченої Дню університету*. Житомир, 2008. С. 16.

42. Grabar I.G., Kolodnytska R.V., Arystarkhova E.O., Ilchenko A.V. The problem of clean ecological diesel fuels introducing on base of rapeseed oil. *AMMA 2002* : The National Conferens with International Participation Automobile, Environment fnd Agricultural Machinery. Cluj-Napoca, 2002. P. 255-256

43. Ільченко А.В. Похибка розробленого методу визначення та контролю витрат біопалив двигуном автомобіля. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції. Вінниця, 2025. С. 141–142.

44. Ільченко А. В. Контроль витрат біопалив як інструмент підвищення ефективності експлуатації засобів автомобільного транспорту. *Сучасні технології та перспективи розвитку*

автомобільного транспорту: тези XVII Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир, 2024. С. 86–87.

45. Ільченко А. В. Тростенюк Ю. В., Тростенюк Ю. І. Вплив в'язкості біопалив на точність вимірювання їх витрат термоанемометричним витратоміром. *Всеукраїнська науково-практична on-line конференція аспірантів, молодих учених та студентів, присвячена Дню науки*. Житомир, 2015. С. 37–38.

46. Ільченко А. В. Шляхи покращення функціональних можливостей термоанемометричного витратоміра біопалив. *Синергетика, фрактали і новітні технології*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир, 2024. С. 106–110.

47. Ільченко А.В. Перевірка адекватності методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем розсіювання витрат бензинів з домішками біоетанолу. *Підвищення якості продукції машинобудівних та ремонтних підприємств*: IV Всеукраїнський науково-практичний онлайн-семінар. Харків, 2025. С. 41-42.

48. Безвесільна О. М., Ільченко А. В. Особливості застосування і вимірювання витрат біопалив дизельними двигунами, що оснащено термоанемометричними витратомірами. *Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців*: наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2017. С. 186–187.

49. Безвесільна О. М., Ільченко А. В., Тростенюк Ю. В. Експериментальний зразок термоанемометричного витратоміра моторних біопалив для двигунів внутрішнього згоряння. *Проблеми розвитку транспорту і логістики*: збірник наукових праць VII-ої Міжнародної науково-практичної конференції. Одеса, 2017. С. 171–173.

50. Безвесільна О. М., Ільченко А. В., Ткачук А. Г., Багінський О. О. Спосіб розширення діапазону вимірювання витрат палив двигунів транспортних засобів термоанемометричним витратоміром. *Новітні технології розвитку автомобільного транспорту*: наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції, 16-19 жовтня 2018 р. Харків, 2018. С. 74–77.

51. Kolodnytska R. Kravchenko A., Ilchenko A., Vasylyev O. Fuel cell vehicles in Ukrainian perspective. *International Conference on Sustainable Materials and Energy Technologies,* 12-13 September, Coventry UK, 2019. P. 30.

52. Bezvesilna H., Ilchenko A., Tytarenko V., Krushynska N. Increasing accuracy of motor fuel consumption via calorimetric flowmeter. *Dynamics of the development of world science*: Abstracts of I International Scientific and Practical Conference. Vancouver, Canada, 25-27 September, 2019. P. 239-247.

53. Багінський О. О., Ільченко А. В. Визначення параметрів руху дизельного палива в двосекційному термоанемометричному витратомірі. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: XIII Міжнародна науково-практична конференція. Житомир. 2020. URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-ontent/uploads/2020/11/4.pdfhttps://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/11/4.pdf

54. Ільченко А. В. Удосконалення конструкції теплового витратоміра рідких моторних палив. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: XI Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція. Вінниця, 2023. С. 136–138.

55. Багінський О. О., Брожко А. М., Дивак С. О., Ільченко А. В. Вибір конструкції та принципу дії витратоміра палива для використання на транспортних засобах. *Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвячена*

Дню науки. Житомир, 2019. С. 192–194, URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/05/7-tarnsportni-tehnologiyi-.pdf

56. Ільченко А. В. Поліпшення точності вимірювання витрат моторних палив тепловим витратоміром. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези XVI Міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 2023. С. 149-151.

57. Ільченко А. В., Багінський О. О. Моделювання процесу руху палива в трубці теплового витратоміра. *78-а Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів НТУ*: тези доповідей. Київ, 2022. С. 33. DOI: 10.33744/2786-6459-2022-78.

58. Ільченко А. В., Поліщук Д. С. Зменшення похибки виміру витрат палив тепловим витратоміром вибором його конструктивних параметрів. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем*: тези конференції. Рівне, 2022. С. 249–251.

59. Ільченко А. В. Вплив геометричних параметрів трубки теплового витратоміра на радіальний тепловий потік. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези XV Міжнародної науково-практичної конференції державного університету «Житомирська політехніка». Житомир, 2022. С. 49–50.

60. Ільченко А. В. Буздуган К. А. Вплив діаметра нагрівального елемента теплового витратоміра на похибку виміру витрати палива автомобіля. *Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів і машин*: тези міжнародної конференції. Київ, 2022. С. 61–63. DOI: 10.33744/978-966-632-316-6-2022-1

61. Ільченко А. В. Перевірка впливу діаметра нагрівального елемента теплового витратоміра на похибку вимірювання витрати палива ДВЗ.

Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури: виклики воєнного часу: матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2022. С. 276-279.

62. Бегерський Д .Б., Ільченко А. В. Моделювання процесів руху палива в багатосекційному тепловому витратомірі. *79-а Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів НТУ*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2023. С. 66–67. DOI: 10.33744/2786-6459-2023-79

63. Ільченко А. В. Тепловий витратомір моторних палив з розширеним діапазоном виміру витрат. *Міжнародна науково-практична конференція Auto-TRAK-2023*: тези доповідей. Київ, 2023. С. 111–113.

64. Безвесільна О.М., Ільченко А.В. Термоанемометричний витратомір біопалива для автомобільних двигунів. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 2017. С. 66–68.

ABSTRACT

Ilchenko Andrii. Scientific foundations of creating methods for calculating cars' fuel efficiency indicators via controlling the biofuels consumption.

Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences: 05.22.20 – "Vehicles Operation and Repair" (27 Transport). – Vinnytsia National Technical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Vinnytsia, 2025.

The operation of transport internal combustion engines, including automobile engines, must necessarily include accounting for fuel consumption, as they are a comprehensive diagnostic parameter of a vehicle, an indicator of the technical condition of all its units, systems and components, as well as an important component of the transport work cost, that requires consideration and analysis, etc. The results of fuel consumption measurements are also used to calculate indicators of the mixture formation process, optimize the composition of fuel-air mixtures for various speed and load modes of the internal combustion engine operation.

The issue of diversifying energy resources use for Ukraine comes to the fore, especially under the conditions of russia's full-scale invasion into Ukraine.

The dissertation solves the current scientific problem of saving motor liquid biofuels via calculating and measuring their consumption dispersion using developed high-precision measuring devices, that enables to standardize and control the consumption of biofuels with different volumetric concentrations of various biological impurities.

Theoretical and experimental studies of liquid biofuel consumption dispersion by a car engine when operating on fuels were conducted using the developed thermoanemometric flowmeter, which differs from existing ones in the extended range of fuel consumption (biofuels) measurement

used in road transport, increased measurement accuracy, adaptability to changes in the physicochemical properties of liquid biofuels of different composition and to specific transport and road conditions of vehicle operation.

According to the dissertation work results it was established the following:

I. Theoretical studies

1. The main physicochemical properties of biofuel components and their influence on the operation of internal combustion engines are considered. It is emphasized that for internal combustion engines today, the replacement of petroleum fuels with alternative fuels of biological origin is promising, that have a number of advantages compared to traditional mineral ones: the possibility of production from renewable raw materials and agricultural products, carbon neutrality, environmental friendliness, complete biological solubility under atmospheric conditions, etc.

2. It is shown the main global trends in the growth of biofuel production, in particular in countries such as the USA, the EU, Indonesia and Argentina. It is noted that despite the situation when civilized humanity, having begun to recover from the coronavirus pandemic, faced a new challenge - russia's military invasion into Ukraine, the biofuel market continues to develop actively.

3. The analysis of the regulatory framework for determining fuel consumption standards shows that to consider the variety of motor vehicles operating conditions, in addition to the basic fuel consumption standards, it is obligatory to use a large number of adjustment coefficients. At the same time, to establish standards and control the consumption of biofuels for motor vehicles based on the existing legislative framework, it is mandatory to carry out experimental studies of consumption in real operating conditions, that is a rather laborious and long process, besides its results are

affected by the factors that are hard to take into consideration (weather conditions, road surface conditions, driver's character, style and experience, etc).

4. It was offered to introduce the following new categories: relative density $\Delta\rho$, relative lower calorific value ΔH_u of bio-additives and relative theoretically required amount of air for combustion of 1 kg ΔL_0 of the additive in biofuel, that enable to formulate the condition of reducing the consumption of biofuels by the motor vehicle's internal combustion engine, comparing and selecting biofuels with different additives of different volumetric concentrations from the point of view of changing their consumption, establishing consumption standards for liquid biofuels depending on the volumetric concentration of the bioadditive known from the specified properties in the fuel.

5. It is offered the concept of a new method for calculating vehicle fuel efficiency indicators by controlling the dispersion of liquid biofuel consumption and its structural and logical scheme is developed for determining and controlling biofuel consumption by a motor vehicle that has known design parameters and moves in known conditions at known modes. The concept of the method lies in determining and use the suggested coefficient of change in biofuel consumption, considering the change in density, lower calorific value and theoretically required amount of air for combustion of 1 kg of biofuel depending on the volumetric concentration of the biological component in it, which makes it possible to regulate and control of biofuel consumption dispersion during vehicle operation. It was analyzed the relationship in the elements of the suggested structural-logical scheme between the parameters of conditions, driving mode, vehicle design and properties of biofuels with different volumetric concentrations of the biological component enabling to improve the system of biofuels control and to improve its efficiency in the process of vehicles operation.

6. It has been established that with an increase in the concentration of bioadditives in fuel (gasoline or diesel), the increase in its consumption by a motor vehicle happens mainly due to a decrease in the biofuel energy component. However, all analyzed alternative additives to gasoline and diesel fuel lead to increased fuel consumption with increasing additive concentrations.

7. It has been established that from the point of view of changing the consumption of biofuels, diesel fuels with rapeseed oil admixtures are more attractive for vehicles with diesel engines, since it has the smallest value of change coefficient of biofuels consumption. For gasoline engines, if only bioethanol is used as fuel, an increase in its consumption by 63% should be expected.

8. It was obtained numerical values of the nominal specific fuel consumption of gasoline with spark ignition and diesel (with undivided combustion chambers, swirl chamber and pre-chamber) engines operating on biofuels with different content of impurities (bioethanol, rapeseed oil), which must be considered for opting for the measurement range and controlling biofuel consumption.

9. A new criterion for assessing changes in biofuel consumption has been proposed, which enables analyzing and comparing biofuels with different volumetric concentrations of various biological components during vehicle operation: a decrease in consumption occurs if the value is negative, and the quantitative value of the biofuel consumption depends on the impurity concentration and is determined by the suggested change coefficient in consumption.

It has been proven that the most attractive from the point of view of biofuel consumption by motor vehicle are additives that have a higher density than the "main" fuel, a lower calorific value, and a theoretically required amount of air for combustion of 1 kg.

10. It was conducted an analytical review of liquid flow measurement methods and designs of existing flow meters, their classification, disadvantages and advantages were considered, and the main requirements for fuel flow meters were formulated.

It is shown that the most attractive for use in motor vehicles are thermal anemometric flow meters, however, they also require improvement and adaptation for measuring biofuel consumption in motor vehicles.

11. It was analyzed the existing mathematical model of the temperature field in the biofuel flow passing through a thermal anemometric flowmeter. A mathematical model for determining the radial heat flux in a thermoanemometric flowmeter tube with a cylindrical wall (linear heat flux density) has been developed, introducing new categories - the constructive coefficient and the coefficient of radial thermal conductivity of the thermoanemometric flowmeter tube. It was analyzed their influence on the radial heat flux. Ways of increasing the thermoanemometric flowmeter sensitivity and increasing the flow measurement accuracy are shown, which comprise design parameters mutual consideration of the thermoanemometric flowmeter and biofuel properties.

12. To increase the accuracy of measuring biofuel consumption via a thermoanemometric flowmeter, the need to consider the thermal conductivity of the fuel and the material of the thermoanemometric flowmeter tube, reducing the diameter of the heating element and increasing the diameter of the thermoanemometric flowmeter tube, as well as the number of thermal converters in the flow of various biofuels, has been substantiated. It was obtained dependencies of the ratio of the tube diameter to the diameter of the thermal anemometric flowmeter heating elementfor tube materials of different thermal conductivity, the use of which enables reducing the influence of the radial heat flow on the axial one, that will reduce the error in measuring biofuel consumption.

13. A new mathematical model of the temperature field distribution along the flowmeter tube was obtained and it was calculated the biofuel flow refined value. Methods for increasing the accuracy and speed of the thermal flowmeter based on the use of modern specialized neuroprocessors are suggested, that enables compensating for the influence of random and dynamic errors in measuring biofuel flow.

14. It has been proven that to reduce the error in measuring the motor vehicle fuel consumption, it is necessary to reduce the radial heat flow influence in the thermal anemometric flowmeter on the axial heat flow, as well as to reduce the diameter of the heating element and increase the tube diameter of the thermal anemometric flowmeter.

15. It was obtained the dependencies of the ratio of the tube diameter to the diameter of the thermal anemometric flowmeter heating element for tube materials of different thermal conductivity, enabling to reduce the radial heat flow influence on the axial one and reducing the error in measuring fuel consumption.

16. It was recommended to conduct the additional research of a thermoanemometric flowmeter with a flat spiral heating element, since the suggested shape of the heating element will presumably make the radial heat flow more uniform, reducing its impact on the axial heat flow and, accordingly, on the error in measuring biofuel consumption.

17. It was carried out the assessment of the quality, possible errors and uncertainty of measuring biofuel consumption applying a thermal anemometric flowmeter. It was noted that the discrepancy between the results obtained experimentally and by computer modeling is possible due to different physicochemical properties (thermal conductivity, viscosity, density, etc.) of the fuel and its properties specified in the computer model.

18. Analysis of existing designs and the principle of operation of thermal anemometric flowmeters enables us to state that they best meet the requirements for their use in transport, including for measuring biofuels

consumption from alternative raw materials. To improve their functionality, it was developed the following:

- a high-precision motor fuel flow meter with digital processing of measurement information enabling subject to correction of dynamic errors and considering the current values of fuel physicochemical properties, to increase the accuracy of fuel consumption measurement by 1.5...1.8 times;
- calorimetric motor fuel flow meter with digital processing of measurement information, enabling to automate the process and increase the accuracy of fuel consumption measurement by 1.2-1.4 times due to the introduction of logarithm blocks, linear approximation, fuel consumption calculation, a thermal converter placed in the fuel flow outside the action zone of the prototype heating element, and two groups of thermal converters located on different sides of the prototype heating element, and the thermal converters in these groups are placed sequentially at specified distances from this heating element;
- two calorimetric motor fuel flow meters with increased measurement accuracy, which are capable of reducing the error compared to the prototype by 7-19% due to the introduction of a temperature control unit, input heating the direct and return fuel flows, providing the ability to regulate the fuel temperature at the inlets of the direct and return fuel flow tubes, and also due to the introduced compensation for temperature error, gravity error, current supply and viscous friction. The suggested flow meters are able to be integrated into all modern power supply systems of internal combustion engines with reverse fuel flow into the tank.

19. It was developed the method to expand the range of fuel flow measurement with a thermomaneometric flowmeter. It implies using sequentially installed sections with a certain ratio of diameters, which makes it possible to change the fuel flow rate through the flowmeter several times. It was offered a new signal processing algorithm in a multi-section thermoanemometric viratomer increasing the informativeness of the biofuel

consumption measurement process: to obtain a temperature distribution in the fuel flow of maximum informativeness (with the largest difference between neighboring thermal converters), e.g. to reduce the error in measuring fuel temperatures, It is necessary to opt for temperature analysis exactly that tube of a multi-section flowmeter where it approaches the form when the sum of temperature differences between all neighboring thermal converters of the flowmeter tube is maximum.

20. It was offered the ways to improve the process of measuring biofuel consumption by an internal combustion engine using a thermomaneometric viratometer, which implies:

- opting for the size and number of tubes of a multi-section flowmeter, their material, the number of thermal transducers and their installation locations (from the outside, in front of the heating element, on the heating element, in the fuel flow after the heating element);
- reducing the influence of the tubes' connecting cones of the multi-section heat flow meter on the movement of the fuel flow to avoid local swirls and their influence on the total temperature field;
- the correct option for types, designs and sizes of heat flow meter heaters, that must be consistent with the dimensions of the tubes and the materials from which they are made;
- considering fuel heating temperatures values depending on their type and the concentration of the biological component in them.

21. The introduction of biofuels onto the Ukrainian market is a promising way to reduce the country's dependence on fossil fuels, which is very relevant both during the period of martial law and during the post-war reconstruction of Ukraine.

The assessment of the advantages and disadvantages of using biofuels, namely diesel fuel with the addition of rapeseed oil, has established a significant dominance of the advantages over the disadvantages enabling us to recommend this type of biofuel as an

alternative to fossil fuels. Further research is needed to establish the economic reasoning for converting vehicles to use different types of biofuels.

II. Computer modelling

1. It was obtained the dependencies of biofuel temperatures along the axis of the thermal flowmeter tube, taking into consideration their flow rates from the distance to the heating element. It was established that in order to increase the measurement accuracy and sensitivity of the thermal anemometric flowmeter for different biofuel flows, it should have the following geometric parameters: the ratio of the tube inner diameter to the heating element diameter d2/d1=3/2. It is advisable to measure fuel consumption at a distance of 1…7 cm from the heating element along the flow meter tube axis for vehicles running on biofuels with a relatively small dynamic viscosity.

2. It was simulated the heat flow in the tube of the thermoanemometric flowmeter and the temperature dependencies on the distance to the heating element along the axis of the flowmeter tube were obtained for different contents of vegetable oils in diesel fuel in the flow range of 5-25 l/h. It was obtained the dependencies of the temperatures of diesel fuel, vegetable oil, and various volumetric concentrations of oils in diesel fuel along the tube axis of the thermoanemometric flowmeter, on the grounding on which it is possible to determine the specified biofuels consumption.

3. It was presented the results of heat flow computer simulation in a thermal anemometric flowmeter with sequentially installed tubes 5 cm long and with diameters of 10, 30, 50 cm, respectively. The simulation was conducted for flows of 100 l/h and 200 l/h. A graphical distribution of flow velocities and temperatures in certain sections of the heat flow meter was obtained under the following conditions: ambient temperature 20 °C, inlet fluid temperature 10 and 30 °C.

4. It was simulated the heat balance of the heating element in the biofuel moving flow to identify the main parameters of the mathematical model, on which the accuracy and speed of the thermal anemometric flowmeter depend. The results analysis showed that to increase the accuracy of measuring biofuel consumption with a thermal anemometric flowmeter, the fuel temperature should be simultaneously measured at the corresponding flow points. It was obtained a graphical representation of the temperature distribution in the flow of different fuels for their different speeds (flow rates).

III. Experimental research

1. It has been experimentally proven that the time of the thermal anemometric flowmeter reaching the operating temperature regime for different currents passing through the heating element and different concentrations of rapeseed oil in diesel fuel depending on the content of rapeseed oil in diesel fuel, it changes by 9.3 times, which must be considered in the algorithm of the thermomaneometric flowmeter to increase measuring biofuel consumption accuracy.

2. It was established by the measurements of fuel consumption on the route of the vehicle that:

- the developed thermoanemometric flowmeter is capable of operating in vehicle traffic conditions with the required level of reliability, its application is possible and requires additional research into the operation of the thermoanemometric flowmeter in a wider range of road and vehicle operation transport conditions;
- the relative error in measuring fuel consumption on the route of a Citroen Berlingo car with a 1.9-liter diesel engine, determined using a thermal anemometric flowmeter and a volumetric method, on a route of 1.2 km was 2.8%;

- the heating element diameter in the tube of the thermomaneometric flowmeter influences the error in measuring fuel consumption and its reduction enables reducing this error by 1.2-1.6 times.

3. It was established on the stand with running drums, numerical values of the consumption of biofuels based on diesel fuel with rapeseed oil admixtures by volume of 15 and 30% by a GAZ-33060 car in the speed range of 65-95 km/h.

Scientific novelty of the results obtained

The scientific novelty of the results obtained lies in the generalization and deepening of known scientific foundations and the development of a new method for calculating parameters for controlling cars fuel efficiency, which enables taking into consideration the change in the biofuels physicochemical properties depending on the concentration of the biological component (bio-impurity) in them, in particular:

• for the first time:

- it was scientifically substantiated and experimentally confirmed the feasibility of introducing new categories: bio-impurities relative density, the relative lower calorific value of bio-impurities, and the relative theoretical required amount of air for combustion of 1 kg of bio-impurities, that enables to increase the accuracy of controlling their consumption.

- it was offered new approaches and it was developed the method for assessing the change in density, lower calorific value and the theoretically required amount of air for 1 kg of an admixture combustion depending on the fuel consumption of a car running on gasoline (or diesel fuel) and the fuel consumption of a car running on biofuel with a known volumetric concentration of the biological component;

- it was established the relationship between the physicochemical indicators of biofuels with a known volumetric concentration and a known bioadditive properties and the condition of reducing the consumption of biofuel in a

car, which enables improving its operating efficiency indicators.

• it was improved:

- the scientific direction of modelling the temperature distribution in the fuel flow of a thermoanemometric flowmeter by introducing coefficients that consider its design parameters and the biofuels physicochemical properties.The suggested method differs from existing ones in the ability to reduce random and dynamic errors in measuring and controlling biofuel consumption using modern specialized neuroprocessors;

• received further development:

- method for determining the heat flow in the tube of a thermoanemometric flowmeter taking into consideration its design parameters (ratio of tube diameter to the diameter of the heating element, tube material and radial thermal conductivity of the thermoanemometric flowmeter, that differs from existing ones in the ability to select parameters of structural elements that reduce the error in measuring and controlling biofuel consumption;

- a method of assuming rational design parameters of a thermal anemometric flowmeter, which is different from existing ones by varying sequentially installed tubes of different diameters, selected in a certain way, and by simultaneous analysis of their operating conditions. This approach enables to get increased accuracy and speed of measurement and biofuel consumption control, expands the range of flow measurement and the functionality of thermal anemometric flow meters in terms of automating the measurement and control process.

The credibility of the obtained results is ensured by the use of substantiated methods and means of numerical modeling, by the coordination of calculations obtained by various methods, by the correspondence of the results of experimental data to theoretical calculations obtained by the author personally, and by the other researchers' data.

Practical value of the results obtained

The practical value of the results presented in the work is determined by its focus on improving the vehicle operation effectiveness by increasing the accuracy and speed of measuring and controlling biofuel consumption. The practical results are the following:

1. It was developed a method for taking into consideration the biological component in biofuel, which enables, considering its concentration, to determine the biofuel consumption of a vehicle that has known design parameters and moves at known modes in known conditions.

2. It was improved the design of the thermal anemometric flowmeter by using new elements: an external thermal converter, a neuroprocessor with a switch block and a computer, logarithmization blocks, linear approximation and flow calculation blocks, groups of thermal converters on different sides of the heating element, a heating element at the inlet to the thermoanemometric flowmeter with a temperature control unit, a fuel return flow tube with a subtraction unit, sequentially installed tubes of different diameters, selected in a certain way with simultaneous analysis of their operation ensuring increased accuracy and speed of measurement and control of biofuel consumption, expansion of the consumption measurement range, fuel range, and functionality of the thermal anemometric flowmeter for automation of measurement and control.

3. The novelty and practical value of the offered technical solutions is confirmed by 4 patents for inventions, 2 certificates of registration of work copyright, the use of the content which enables solving the problems of measuring and controlling biofuel consumption with increased accuracy and speed, and provides expansion of the functional capabilities of the thermal anemometric flowmeter.

Research methods

By calculation and analytical method:

- using an improved mathematical model of changes in biofuel consumption (based on gasoline with ethyl alcohol admixtures; based on diesel fuel with vegetable oil admixtures) by the internal combustion engine of a motor vehicle, which enables to set basic and additional fuel consumption standards when using gasoline with bioethanol admixtures of various concentrations or diesel fuel with admixtures of vegetable oils in real conditions of vehicle operation, it *was established* that that with an increase in the concentration of impurities in the fuel (gasoline or diesel), the increase in biofuel consumption appears mainly due to a decrease in the energy component of the fuel, while all analyzed bio-impurities to the main fuel (gasoline and diesel) increase the biofuels consumption by the engine of a motor vehicle with increasing their concentrations, which must be considered when opting for the characteristics of consumption control means;

- grounding on the introduced categories (relative density $\Delta\rho$, relative lower calorific value ΔH_u and relative theoretically required amount of air for combustion of 1 kg of admixture ΔL_0), the criterion for the consumption of two-component fuel was formulated as the sum of these characteristics. It was proven that in the best case, it is necessary to use additives having a higher density, relative to the main fuel, a lower calorific value, and a theoretically required amount of air for combustion of 1 kg. It *was suggested* a criterion for changing fuel consumption, that is used as follows: a decrease in the consumption of two-component fuel occurs in the case of a negative value of the fuel consumption criterion $\Delta\rho+\Delta L_0+\Delta H_H$. The quantitative value of fuel consumption depends on the impurity concentration and is determined by the suggested index of change in consumption. These characteristics enable to analyze and select the necessary range of measurement and control of biofuel consumption.

- it *was obtained* analytical dependencies of the tube diameter ratio to the diameter of the thermal anemometric flowmeter heating element for

different tube materials, which enables analyzing the influence of the radial heat flow on the axial one and, accordingly, reducing the error in fuel consumption measurement. It was offered to reduce the error in measuring fuel consumption due to the reduction of the influence of the radial heat flow in the thermal anemometric flowmeter on the axial heat flow (without considering the fuel thermal conductivity and the material of the flowmeter tube). It is necessary to reduce the heating element diameter and increase the tube diameter of the thermoanemometric flowmeter, and for increasing the sensitivity of the thermoanemometric flowmeter, it is advisable to use the required number of thermal converters, which depends on the amount of fuel consumption.

- it *was analyzed* the existing mathematical model of the temperature field in the biofuel flow passing through the flowmeter to determine its main constituent elements. It *was elaborated* a mathematical model for determining the radial thermal conductivity of a thermoanemometric flowmeter with a cylindrical wall, which *introduces* the categories of the design coefficient and the radial heat flow coefficient of the thermoanemometric flowmeter. It *was analyzed* their influence on the value of the radial heat flow. It was *shown* that the change in the radial heat flow in the tube of the thermal anemometric flowmeter depends on the product of the radial thermal conductivity coefficient, design coefficient and temperature difference between the outer surface of the tube of the thermal anemometric flowmeter and the heating element, and the diameter of the inner tube surface does not affect the radial heat flow value.

- it *was conducted* a simulation of the heating element heat balance in the moving fuel flow through a thermoanemometric flowmeter to identify the main parameters of the mathematical model, on which the accuracy and speed of the thermoanemometric flowmeter depend. The results analysis of the results showed that in order to increase fuel consumption measuring accuracy with a thermal anemometric flowmeter, the fuel temperature

should be simultaneously measured at the corresponding points of the flow. It *was obtained* a graphical representation of the temperature distribution in the flow of different fuels for their different speeds (flow rates).

- it *was obtained* a mathematical model of the temperature field distribution along the tube of the thermal anemometric flowmeter and it was calculated the refined value of the biofuel flow rate. *It was suggested* the methods for increasing the accuracy and speed of a thermal anemometric flowmeter grounding on the use of modern specialized neuroprocessors, which enables compensating for the influence of random and dynamic errors in measuring biofuel consumption. It was offered the methods for increasing the accuracy and speed of a thermal anemometric flowmeter based on the use of modern specialized neuroprocessors, which enable compensating for the influence of random and dynamic errors in measuring biofuel consumption.

- it *was obtained* a simplified equation for the radial heat flow of two- and multi-component fuels in the tube. It was shown that the coefficient value of radial thermal conductivity of the tube of a thermoanemometric flowmeter for mixed fuels is equal to the thermal conductivity value of the fuel itself. It was offered to represent the temperature change along the tube axis of the thermoanemometric flowmeter as a linear dependence on the distance to the heating element of the thermoanemometric flowmeter.

- it *was obtained* dependencies of biofuel temperatures along the tube axis of the of the thermoanemometric flowmeter, taking into consideration their flow rates from the distance to the heating element. It *was established* that in order to increase the measurement accuracy and sensitivity of the thermal anemometric flowmeter for gasoline, diesel fuel, bioethanol, vegetable oil and their various consumption by the engine of a motor vehicle it should have the ratio of the tube/s inner diameter to the heating element as $d_2/d_1=3/2$.

- it *was obtained* the dependencies of the tube diameter ratio to the heating element diameter of the thermoanemometric flowmeter for tube materials of different thermal conductivity, that enables reducing the influence of the radial heat flow on the axial one and will ultimately reduce the error in measuring fuel consumption. It *was proven* that for reducing a measuring error due to the reduction in the radial heat flow influence in the thermal anemometric flowmeter on the axial heat flow, it is necessary to reduce the diameter of the heating element and increase the tube diameter of the thermal anemometric flowmeter (without taking into consideration the thermal conductivity of the fuel and the tube material).
- it *was conducted* the assessment of the quality, possible errors and uncertainty of measuring biofuel consumption by a thermal flow meter. It *was noted* that the discrepancy between the results obtained experimentally and by computer modeling is possible due to different physicochemical properties (thermal conductivity, viscosity, density, etc.) of the fuel and its properties specified in the computer model.

Via the method of numerical computer modelling:
- it *was simulated* the heat flow in the tube of the thermoanemometric flowmeter and the temperature dependencies on the distance to the heating element along the axis of the flowmeter tube for different vegetable oil contents in diesel fuel in the flow range of 5-25 l/h;
- it *was obtained* the temperatures dependencies of of bioethanol, gasoline, diesel fuel, and vegetable oil in the tube of a thermoanemometric flowmeter on the distance to the heating element with diameters of 2, 3, and 4 mm in the flow range of 5-25 l/h, enabling to determine the flow rates numerical values of these fuels;
- it *was obtained* the dependencies of temperatures of diesel fuel, vegetable oil and various volumetric concentrations of vegetable oils in diesel fuel along the tube axis of the thermoanemometric flowmeter, on the basis of

which it is possible to determine the flow rates of the specified fuels in the range from 5 to 25 l/h;

- it *was obtained* a graphical distribution of the heat flow velocities and temperatures in the tube of a three-section thermal anemometric flowmeter with sequentially installed tubes 5 cm long and diameters 10, 30, 50 cm, respectively. The simulation was carried out for flows of 100 l/h and 200 l/h, ambient temperature 20 °C, fuel temperatures at the inlet 10 and 30 °C.

Via experimental method:

- it *was established* the time dependencies of the thermal anemometric flowmeter reaching the operating temperature regime for currents through the heating element of 0.024…0.12 A and it was established the concentrations of rapeseed oil in diesel fuel of 0…100%. It has been proven that the entry time of the thermal anemometric flowmeter into the operating mode for different currents passing through the nichrome heating element and different concentrations of rapeseed oil in diesel fuel, varies by 9.3 times depending on the magnitude of the current passing through the heating element and the volumetric content of rapeseed oil in the fuel, which must be considered to build the flowmeter operation algorithm.

- it *was established* that the developed thermoanemometric flowmeter is capable of operating under the conditions of vehicle movement with the required level of reliability, its use on vehicles is possible and requires additional research into the thermoanemometric flowmeter operation in a wider range of road and transport conditions of vehicles operation;

- it *was determined* that the relative error in measuring fuel consumption on the route of a Citroen Berlingo car with a 1.9-liter diesel engine, which was determined using a thermal anemometric flowmeter and a volumetric method, on ten trips in the forward and ten trips in the reverse directions on routes with a length of 1.2 km was 2.8%;

- it *was established* the influence of the heating element diameter of the thermoanemometric flowmeter on the error in measuring fuel consumption of the Citroen Berlingo car. It has been proven that the diameter of the heating element in the tube of the thermoanemometric flowmeter affects the error in measuring fuel consumption, and its reduction enabless reducing this error by 1.2-1.6 times.

- it *was obtained* numerical values of biofuel consumption, on a stand with running drums, with admixtures of 15 and 30% by volume of rapeseed oil for a GAZ-33060 vehicle, which enabled to verify the adequacy of the developed method for calculating fuel vehicles' efficiency indicators via controlling the liquid biofuel consumption dispersion;

- using a thermoanemometric flowmeter, it *was obtained* fuel consumption indicators of a Citroen Berlingo passenger car on a driving route;

- a conclusion *was obtained* on the need for additional research into a thermoanemometric flowmeter with a flat spiral heating element, since the proposed shape of the heating element will presumably make the radial heat flow more uniform, that will reduce its impact on the axial heat flow and, accordingly, on the error in measuring and controlling biofuel consumption using a thermal anemometric flowmeter.

Research results implementation:

- Regional Development Department of Zhytomyr Regional State Administration and Zhytomyr Regional Military Administration;
- State Enterprise "DerzhavtotransNDIprojekt";
- State Enterprise "Research Institute of Metrology of Measuring and Control Systems" (SE RDI "Sistema");
- United Science and Capital AB (Halmstad, Sweden);
- Foreign Investment Company "Danico" LLC (Zhytomyr Region, Ukraine);

- in the educational process of Polissya National University (Zhytomyr) in terms of courses preparation "Use of equipment in the agro-industrial complex", "Tractors and cars".

Keywords: car, alternative fuel, gasoline, biofuel, bio-admixture, exhaust gases, fuel consumption, flow meter, engine, internal combustion engine, diesel engine, diesel fuel, environmental performance, fuel, fuel economy, measurement error, vehicle.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THESIS SUBJECT

Publications in scientific professional editions of Ukraine

1. Ilchenko A. V., Kolodnytska R.V., Kuriata V.P. Vplyv dobavok rozlynnykh olii na vmist sazhi u vidpratsovanykh hazakh dvyhuna avtomobilia. *Visnyk SNU im. Dalia*. Luhansk, 2005. № 6(88). S. 225–229.

2. Ilchenko A. V., Kuriata V.P. Matematychna model vidkladannia sazhi u vypusknomu trakti dvyhuna avtomobilia. *Visnyk ZhDTU*. Zhytomyr, 2006. № 3(38). S. 20–24.

3. Ilchenko A.V., Kuriata V.P. Vplyv domishok roslynnykh olii do dyzelnoho palyva na dymnist vidpratsovanykh haziv dvyhuna. *Visnyk ZhDTU*. Zhytomyr, 2007. № 1(40). S. 29–34.

4. Ilchenko A. V. Teoretychni osnovy normuvannia vytrat motornykh palyv z vysokooktanovymy kysnevmisnymy dobavkamy. *Visnyk ZhDTU*. Zhytomyr, 2004. № 1(28). S. 32–38.

5. Hrabar I. H., Ilchenko A. V., Kolodnytska R. V. Zmina vytraty motornykh palyv z dobavkamy ripakovoi olii. *Visnyk ZhDTU*. Zhytomyr, 2004. № II(29). S. 19–23.

6. Ilchenko A.V., Bezvesilna O.M., Trosteniuk Yu.V. Peredacha tepla v termoanemometrychnomu vytratomiri biopalyv. *Visnyk Skhidnoievropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. Kharkiv, 2014. S. 47–51. doi:10.15587/1729-4061.2014.28638

7. Ilchenko A. V. Teoretychni peredumovy zmenshennia vytrat dvokomponentnykh motornykh palyv. *Visnyk ZhDTU*. Zhytomyr, 2004. № 4(31). S. 1–8.

8. Ilchenko A. V., Kuriata V. P. Matematychna model vytraty palyva avtomobilia z urakhuvanniam zbidnennia palyvo-povitrianoi sumishi (na prykladi motornykh palyv z domishkamy olii roslynnoho pokhodzhennia). *Visnyk ZhDTU*. Zhytomyr, 2005. № 1(32). S. 15–19.

9. Ilchenko A. V. Kolodnytska R. V., Kuriata V. P. Eksperymentalni doslidzhennia zminy vytrat motornykh palyv z dobavkamy ripakovoi olii. *Avtomobilnyi transport. Zbirnyk naukovykh prats*. Kharkiv, 2005. № 16. S. 267–269.

10. Ilchenko A. V., Romanova A. O. Urakhuvannia vlastyvostei dvokomponentnykh palyv u protsesi vymiriuvannia yikh vytraty termoanemometrychnym vytratomirom. *Visti avtomobilno-dorozhnoho instytutu DVNZ «Donetskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet»*. Donetsk, 2007. № 1(4). S. 106–109.

11. Hrabar I. H., Ilchenko A. V., Kryshevskyi M. B., Kuriata V. P. Eksperymentalni doslidzhennia providnosti palyva BIO-100 z metoiu stvorennia systemy kontroliu yoho yakosti. *Protsesy mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni. Zbirnyk naukovykh prats*. Zhytomyr, 2007. Vypusk 5. ch. 1. S. 151–157.

12. Ilchenko A. V. Obhruntuvannia vyboru motornykh biopalyv za umovy zmenshennia yikh vytrat dvyhunom avtomobilia. *Visnyk ZhDTU*. Zhytomyr, 2008. № 2(45). S. 32–36.

13. Ilchenko A. V. Perspektyvy zastosuvannia biodyzelnoho palyva v avtomobilnykh dvyhunakh. *Visnyk NTU*. Kyiv, 2013. № 27. S. 370–373.

14. Bezvesilna O. M., Ilchenko A. V., Tkachuk A. H., Parkhomenko S. O. Metody vymiriuvannia vytrat ridyny ta konstruktsii vytratomiriv. *Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy*. 2013. № 3–4. S. 216–222.

15. Ilchenko A. V., Bezvesilna O. M., Trosteniuk Yu. V. Zmina radialnoho teplovoho potoku termoanemometrychnoho vytratomira biopalyv dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia. *Visnyk NTU*. Kyiv, 2013. № 28. S. 186–191.

16. Trosteniuk Yu. V., Bezvesilna O. M., Ilchenko A. V. Modeliuvannia osovoho teplovoho potoku trubky termoanemometrychnoho vytratomira biopalyv. *Mizhvuzivskyi zbirnyk «Naukovi notatky»*. Lutsk, 2014. № 46. S. 538–545.

17. Ilchenko A.V., Trosteniuk Yu.V., Trosteniuk Yu.I. Modeliuvannia osovoho teplovoho potoku termoanemometrychnoho vytratomira v zalezhnosti vid vmistu olii roslynnoho pokhodzhennia v dyzelnomu palyvi. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti. Naukovyi zhurnal.* Lutsk, 2014. № 2. S. 61–67.

18. Ilchenko A. V. Vplyv deiakykh parametriv konstruktsii teplovoho vytratomira palyva na peredachu tepla v nomu. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu VNTU*. Vinnytsia, 2021. Tom 13. № 1. S. 54–59.

19. Ilchenko A. V., Bahinskyi O. O. Shliakhy zmenshennia pokhybky vymiriuvannia vytrat palyv teplovym vytratomirom. *Tekhnichna inzheneriia. Derzhavnyi universytet «Zhytomyrska politekhnika».* Zhytomyr, 2023. № 1 (91). S. 207–213.

20. Ilchenko A. V. Metodolohichni osnovy vyznachennia i kontroliu vytrat biopalyv v protsesi rukhu avtomobilia. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu VNTU*. Vinnytsia, 2024. № 1 (19). S. 61–67. DOI: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-61-67

21. Zamula I. V., Ilchenko A. V., Travin V. V. Ekonomichni perspektyvy vykorystannia biopalyva v konteksti realizatsii kontseptsii staloho rozvytku. *Efektyvna ekonomika*. 2024. № 11. DOI: http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.11.8

Publications in scientific periodicals included in scientometric databases

22. Ilchenko, A., Bezvesilna, E. Development of calorimetric motor fuel flowmeter with increased metering accuracy by adjusting the inlet temperature. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014, 6(7). r. 50–54. (Scopus, Q3)

23. Korobiichuk, I., Bezvesilna O., Ilchenko A., … Nowicki M., Szewczyk R. Calorimetric flow meter of motor fuel with inlet temperature regulation. *4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies*. 2017. p. 975–979. (Scopus, Q3)

24. Bezvesilna O., Kamiński M., Ilchenko A. Heat transfer in the thermo-anemometric flowmeter for biofuels. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. r. 505-511. (Scopus, Q4)

25. Korobiichuk I., Bezvesilna O., Ilchenko A., Trostenyuk Y. Thermoanemometric flowmeter of biofuels for motor transport. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. r. 443-448. (Scopus, Q4)

26. Korobiichuk I., Bezvesilna O., Ilchenko A., ...Nowicki M., Szewczyk R. A mathematical model of the thermo-anemometric flowmeter. *Sensors.* Switzerland, 2015. 15(9). r. 22899–22913. (Scopus, Q1)

27. Korobiichuk I., Ilchenko A. Optimal Design Parameters of Thermal Flowmeter for Fuel Flow Measurement. *Sensors*. 2022. 8882. doi.org/10.3390/s22228882. (Scopus, Q1)

28. Ilchenko A., Korobiichuk I. Methods of Reduction of Fuel Consumption Measurement Error by Thermo-Anemometric Flow Meter. Automation 2024: Advances in Automation, Robotics and Measurement Techniques. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1219. *Springer*, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-78266-4_27 (Scopus)

Publications in scientific periodicals of foreign countries

29. Ilchenko A. V. Bahinskyi O. O. Vybir konstruktsii ta pryntsypu dii vytratomiriv dlia yikh vykorystannia na transportnykh zasobakh. *Modern*

engineering and innovative technologies. Nimechchyna, 2021. Vypusk № 17. S. 54–62, DOI: 10.30890/2567-5273.2021-17-02-065

30. Ilchenko A. V. Analiz zminy chutlyvosti termoanemometrychnoho vytratomira biopalyv. *SWorldJournal*. Bolhariia, 2024. № 24. S. 151–160. DOI: 10.30888/2663-5712.2024-24-00-056

Patents for inventions

31. Bezvesilna O.M., Podchashenskyi Yu.O., Ilchenko A.V., Shavurskyi Yu.O. Vysokotochnyi vytratomir motornoho palyva z tsyfrovoiu obrobkoiu vymiriuvalnoi informatsii: pat. 91160 Ukraina: MPK 2009 G01F1/68, G01F1/696, F02M5/00. № 200906515; zaiavl. 22.06.09; opubl. 26.06.10, Biul. № 12. 4 s.

32. Bezvesilna O.M., Ilchenko A.V., Podchashenskyi Yu.O., Shavurskyi Yu.O. Kalorymetrychnyi vytratomir motornoho palyva z tsyfrovoiu obrobkoiu vymiriuvalnoi informatsii: pat. 90985 Ukraina: MPK 2009 F02M5/00. № 200910565; zaiavl. 19.10.09; opubl. 10.06.10, Biul. № 11. 4 s.

33. Bezvesilna O.M., Ilchenko A.V. Kalorymetrychnyi vytratomir motornoho palyva z pidvyshchenoiu tochnistiu vymiriv: pat. 106858 Ukraina: MPK 2014.01 F02M5/00, G01F1/68, G01F1/696, G01F15/00. № 201314550; zaiavl. 12.12.13; opubl. 10.10.14, Biul. № 19. 4 s.

34. Bezvesilna O.M., Ilchenko A.V., Trosteniuk Yu.O. Kalorymetrychnyi vytratomir motornoho palyva z pidvyshchenoiu tochnistiu vymiriv: pat. 106950 Ukraina: MPK 014.01 F02M5/00, G01F1/68. № 201313387; zaiavl. 18.11.13; opubl. 27.10.14., Biul. № 20. 8 s.

Approbation publications

35. Ilchenko A. V. Osoblyvosti protsesu vymiriuvannia vytrat biopalyv bahatosektsiinym termoanemometrychnym vytratomirom. *Perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu ta infrastruktury*: Avtoshliakhovyk

Ukrainy. Zbirka tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Kyiv, 2023. S. 273–276.

36. Ilchenko A. V., Kuriata V. P. Etanol yak tretia komponenta pry vykorystanni dyzelnykh palyv z domishkamy olii roslynnoho pokhodzhennia. *XXXI Naukovo-praktychna mizhvuzivska konferentsiia, prysviachena Dniu universytetu*. Zhytomyr, 2006. S. 20.

37. Kolodnitcka R., Ilchenko A. An investigation of droplet mean diameters and fuel consumption for straight vegetable oil. *Mechanics 2006*: Proceedings of the International Scientific Conferens. Rzeszow University of Technology. 2006. № 231. R. 95–102.

38. Ilchenko A. V., Kolodnytska R. V. Analiz modelei vykydiv sazhi, oksydiv azotu ta vytraty palyv u zastosuvanni do biopalyv u dyzeliakh. *Praktychna kosmonavtyka i vysoki tekhnolohii*: tezy VI naukovo-praktychnoi konferentsii, prysviachenoi 100–richchiu z dnia narodzhennia akademika S. P. Koroleva. Zhytomyr, 2007. S. 83.

39. Ilchenko A. V. Zmina chutlyvosti termoanemometrychnoho vytratomira biopalyva. *Problemy ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*: materialy XII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. Vinnytsia, 2024. S. 124-125.

40. Bezvesilna O.M., Ilchenko A.V., Trosteniuk Yu.V. Prohramno-aparatnyi kompleks dlia vymiriuvannia vytrat motornykh biopalyv termoanemometrychnym metodom. Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi on-line konferentsii aspirantiv, molodykh uchenykh ta studentiv, prysviachenoi Dniu nauky. Zhytomyr, 10-12 travnia 2017 r. https://conf.ztu.edu.ua/tezy-do-dnya-nauky-10-12-travnya-2017-r/

41. Kolodnytska R. V., Ilchenko A. V. Zviazok mizh koefitsiientom ta kryteriiem zminy vytrat dvokomponentnykh palyv dlia dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia. *XXXIII Naukovo-praktychna mizhvuzivska konferentsiia, prysviachenoi Dniu universytetu*. Zhytomyr, 2008. S. 16.

42. Grabar I.G., Kolodnytska R.V., Arystarkhova E.O., Ilchenko A.V. The problem of clean ecological diesel fuels introducing on base of rapeseed oil. *AMMA 2002*: The National Conferens with International Participation Automobile, Environment fnd Agricultural Machinery. Cluj-Napoca, 2002. P. 255-256

43. Ilchenko A.V. Pokhybka rozroblenoho metodu vyznachennia ta kontroliu vytrat biopalyv dvyhunom avtomobilia. *Problemy ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*: materialy XIII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii. Vinnytsia, 2025. S. 141–142.

44. Ilchenko A. V. Kontrol vytrat biopalyv yak instrument pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii zasobiv avtomobilnoho transportu. *Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*: tezy XVII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Zhytomyr, 2024. S. 86–87.

45. Ilchenko A. V. Trosteniuk Yu. V., Trosteniuk Yu. I. Vplyv viazkosti biopalyv na tochnist vymiriuvannia yikh vytrat termoanemometrychnym vytratomirom. Vseukrainska naukovo-praktychna on-line konferentsiia aspirantiv, molodykh uchenykh ta studentiv, prysviachena Dniu nauky. Zhytomyr, 2015. S. 37–38.

46. Ilchenko A. V. Shliakhy pokrashchennia funktsionalnykh mozhlyvostei termoanemometrychnoho vytratomira biopalyv. *Synerhetyka, fraktaly i novitni tekhnolohii*: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Zhytomyr, 2024. S. 106–110.

47. Ilchenko A.V. Perevirka adekvatnosti metodu rozrakhunku pokaznykiv palyvnoi ekonomichnosti avtomobiliv kontrolem rozsiiuvannia vytrat benzyniv z domishkamy bioetanolu. *Pidvyshchennia yakosti produktsii mashynobudivnykh ta remontnykh pidpryiemstv*: IV Vseukrainskyi naukovo-praktychnyi onlain-seminar. Kharkiv, 2025. S. 41-42.

48. Bezvesilna O. M., Ilchenko A. V. Osoblyvosti zastosuvannia i vymiriuvannia vytrat biopalyv dyzelnymy dvyhunamy, shcho osnashcheno

termoanemometrychnymy vytratomiramy. *Avtomobilnyi transport i avtomobilebuduvannia. Novitni tekhnolohii i metody pidhotovky fakhivtsiv*: naukovi pratsi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Kharkiv, 2017. S. 186–187.

49. Bezvesilna O. M., Ilchenko A. V., Trosteniuk Yu. V. Eksperymentalnyi zrazok termoanemometrychnoho vytratomira motornykh biopalyv dlia dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia. *Problemy rozvytku transportu i lohistyky*: zbirnyk naukovykh prats VII-oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Odesa, 2017. S. 171–173.

50. Bezvesilna O. M., Ilchenko A. V., Tkachuk A. H., Bahinskyi O. O. Sposib rozshyrennia diapazonu vymiriuvannia vytrat palyv dvyhuniv transportnykh zasobiv termoanemometrychnym vytratomirom. *Novitni tekhnolohii rozvytku avtomobilnoho transportu*: naukovi pratsi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 16-19 zhovtnia 2018 r. Kharkiv, 2018. S. 74–77.

51. Kolodnytska R. Kravchenko A., Ilchenko A., Vasylyev O. Fuel cell vehicles in Ukrainian perspective. *International Conference on Sustainable Materials and Energy Technologies*, 12-13 September, Coventry UK, 2019. P. 30.

52. Bezvesilna H., Ilchenko A., Tytarenko V., Krushynska N. Increasing accuracy of motor fuel consumption via calorimetric flowmeter. *Dynamics of the development of world science*: Abstracts of I International Scientific and Practical Conference. Vancouver, Canada, 25-27 September, 2019. P. 239-247.

53. Bahinskyi O. O., Ilchenko A. V. Vyznachennia parametriv rukhu dyzelnoho palyva v dvosektsiinomu termoanemometrychnomu vytratomiri. *Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*: XIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia. Zhytomyr. 2020. URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-

ontent/uploads/2020/11/4.pdfhttps://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/11/4.pdf

54. Ilchenko A. V. Udoskonalennia konstruktsii teplovoho vytratomira ridkykh motornykh palyv. *Problemy ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*: XI Mizhnarodna naukovo-tekhnichna internet-konferentsiia. Vinnytsia, 2023. S. 136–138.

55. Bahinskyi O. O., Brozhko A. M., Dyvak S. O., Ilchenko A. V. Vybir konstruktsii ta pryntsypu dii vytratomira palyva dlia vykorystannia na transportnykh zasobakh. *Vseukrainska naukovo-praktychna on-line konferentsiia zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, prysviachena Dniu nauky*. Zhytomyr, 2019. S. 192–194, URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/05/7-tarnsportni-tehnologiyi-.pdf

56. Ilchenko A. V. Polipshennia tochnosti vymiriuvannia vytrat motornykh palyv teplovym vytratomirom. *Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*: tezy XVI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Vinnytsia, 2023. S. 149-151.

57. Ilchenko A. V., Bahinskyi O. O. Modeliuvannia protsesu rukhu palyva v trubtsi teplovoho vytratomira. *78-a Naukova konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, aspirantiv, studentiv ta pratsivnykiv vidokremlenykh strukturnykh pidrozdiliv NTU*: tezy dopovidei. Kyiv, 2022. S. 33. DOI: 10.33744/2786-6459-2022-78.

58. Ilchenko A. V., Polishchuk D. S. Zmenshennia pokhybky vymiru vytrat palyv teplovym vytratomirom vyborom yoho konstruktyvnykh parametriv. *Innovatsiini tekhnolohii rozvytku mashynobuduvannia ta efektyvnoho funktsionuvannia transportnykh system*: tezy konferentsii. Rivne, 2022. S. 249–251.

59. Ilchenko A. V. Vplyv heometrychnykh parametriv trubky teplovoho vytratomira na radialnyi teplovyi potik. *Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*: tezy XV Mizhnarodnoi naukovo-

praktychnoi konferentsii derzhavnoho universytetu «Zhytomyrska politekhnika». Zhytomyr, 2022. S. 49–50.

60. Ilchenko A. V. Buzduhan K. A. Vplyv diametra nahrivalnoho elementa teplovoho vytratomira na pokhybku vymiru vytraty palyva avtomobilia. *Pokrashchennia konstruktyvnykh ta ekspluatatsiinykh pokaznykiv avtomobiliv i mashyn*: tezy mizhnarodnoi konferentsii. Kyiv, 2022. S. 61–63. DOI: 10.33744/978-966-632-316-6-2022-1

61. Ilchenko A. V. Perevirka vplyvu diametra nahrivalnoho elementa teplovoho vytratomira na pokhybku vymiriuvannia vytraty palyva DVZ. *Perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu ta infrastruktury: vyklyky voiennoho chasu*: materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Kyiv, 2022. S. 276-279.

62. Beherskyi D .B., Ilchenko A. V. Modeliuvannia protsesiv rukhu palyva v bahatosektsiinomu teplovomu vytratomiri. *79-a Naukova konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, aspirantiv, studentiv ta pratsivnykiv vidokremlenykh strukturnykh pidrozdiliv NTU*: tezy dopovidei. Kyiv: NTU, 2023. S. 66–67. DOI: 10.33744/2786-6459-2023-79

63. Ilchenko A. V. Teplovyi vytratomir motornykh palyv z rozshyrenym diapazonom vymiru vytrat. *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia Auto-TRAK-2023*: tezy dopovidei. Kyiv, 2023. S. 111–113.

64. Bezvesilna O.M., Ilchenko A.V. Termoanemometrychnyi vytratomir biopalyva dlia avtomobilnykh dvyhuniv. *Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*: materialy X Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Vinnytsia, 2017. S. 66–68.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ …… 68
ВСТУП ……. 71
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ ……. 79
1.1 Системний аналіз науково-практичного досвіду застосування біопалив на автомобільному транспорті ……... 89
1.1.1 Особливості контролю витрат палив на підприємствах автомобільного транспорту …… 104
1.2 Фізико-хімічні властивості компонент біопалив та їх вплив на роботу двигунів внутрішнього згорання …….. 105
1.3 Нормативна база України, що регламентує визначення витрат палив двигунами автомобілів …… 111
Висновки до розділу 1 …… 123
РОЗДІЛ 2 МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ БІОПАЛИВ З УРАХУВАННЯМ ВМІСТУ БІОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ В НИХ …….. 126
2.1 Обгрунтування доцільності контролю витрат біопалив для підвищення ефективності експлуатації засобів автомобільного транспорту …… 126
2.2 Існуючі моделі визначення та контролю витрат палив на автомобільному транспорті …… 129
2.3 Методологічні основи визначення і контролю витрат біопалив в процесі руху автомобіля …… 131
2.4 Особливості контролю та нормування витрат палив з домішками біоетанолу …… 141
2.5 Встановлення додаткових норм витрати біопалив …… 144

2.6 Обгрунтування діапазонів вимірювання і контролю витрат біопалив ……... 150
2.7 Теоретичні передумови зменшення витрат палив з біодомішками …… 154
2.8 Перевірка адекватності розробленого методу визначення та контролю витрат біопалив ……. 155
2.8.1 Похибка розрахунків та експериментальних даних використання дизельного палива з домішками ріпакової олії 156
2.8.2 Порівняння розрахункових та експериментальних даних витрат бензину з домішками біоетанолу ……... 160
2.9 Концепція нових підходів до забезпечення паливної економічності автомобілів розробкою наукових основ оцінювання витрат біопалив з урахуванням фізико-хімічних властивостей і концентрацій біодомішок ……. 161
2.9.1 Загальні положення …… 161
2.9.2 Принципи побудови концепції ……. 162
2.9.3 Методологічні основи концепції …….. 163
2.9.4 Елементна база моніторингу витрат біопалив …… 163
2.9.5 Ефективність концепції ……. 164
Висновки до розділу 2 …… 165
РОЗДІЛ 3 ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ БІОПАЛИВ ……. 169
3.1 Аналітичний огляд методів вимірювання витрати рідин та конструкцій існуючих витратомірів ……. 169
3.1.1 Метод диференціального тиску ……..... 170
3.1.2 Вихровий метод …….. 171
3.1.3 Ультразвуковий метод ……... 171
3.1.4 Масовий (коріолісовий) метод …….. 171
3.1.5 Електромагнітний метод ……... 172

3.1.6 Тепловий метод …….. 173
3.2 Класифікація витратомірів та основні вимоги щодо їх використання на автомобільному транспорті …….. 178
3.3 Вибір принципу дії, конструкції витратоміра біопалив та формулювання вимог до нього …….. 185
3.4 Математична модель теплових потоків термоанемометричного витратоміра біопалив ……. 190
3.4.1 Моделювання часу виходу термоанемометричного витратоміра на робочий режим ……. 190
3.4.2 Моделювання радіального теплового потоку в трубці термоанемометричного витратоміра ……. 196
3.4.3 Передача тепла в термоанемометричному витратомірі залежно від деяких його конструктивних параметрів ……. 199
3.5 Комп’ютерне моделювання осьового теплового потоку в трубці термоанемометричного витратоміра ……. 204
3.5.1 Моделювання осьового теплового потоку витратоміра залежно від вмісту олій рослинного походження в дизельному паливі ……... 213
3.6 Математична модель термоанемометричного витратоміра біопалив …….. 217
3.7 Моделювання теплового балансу нагрівального елемента витратоміра в рухомому потоці палива …… 221
3.7.1 Результати моделювання теплового балансу нагрівального елемента витратоміра в рухомому потоці палива ……... 226
3.8 Перевірка чутливості термоанемометричного витратоміра засобами комп’ютерного моделювання теплового потоку ……. 227

3.9 Удосконалення моделі передачі тепла в термоанемометричному витратомірі біопалив …… 233
Висновки до розділу 3 …… 236
РОЗДІЛ 4 МАКЕТНИЙ ЗРАЗОК, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНОГО ВИТРАТОМІРА БІОПАЛИВ …….. 239
4.1 Конструкція термоанемометричного витратоміра біопалив для засобів автомобільного транспорту …… 239
4.1.1 Вибір типу термоперетворювача термоанемометричного витратоміра ……. 240
4.1.2 Властивості матеріалів, що використовуються для виготовлення термоанемометричних витратомірів ……. 249
4.2 Конструктивні рішення і макетний зразок витратоміра. Налаштування та калібрування ……. 250
4.3 Експериментальне визначення витрати палива автомобіля за допомогою термоанемометричного витратоміра …….. 256
4.3.1 Вимірювання витрати палива на маршруті руху автомобіля …… 256
4.3.2 Дослідження впливу діаметра нагрівального елемента термоанемометричного витратоміра на похибку вимірювання витрати палива ……. 264
4.4 Можливі похибки та невизначеність вимірювань витрат біопалив термоанемометричним витратоміром ……... 266
4.4.1 Похибки вимірювань за джерелом виникнення …… 268
4.4.2 Похибки вимірювань за закономірністю їх змінювання.. 271
4.4.3 Відображення кількісних характеристик похибок вимірювань …….. 274

4.4.4 Якість і невизначеність вимірювань витрат палив термоанемометричним витратоміром …… 276
Висновки до розділу 4 …… 279
РОЗДІЛ 5 ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНІ ВИТРАТОМІРИ БІОПАЛИВ ПІДВИЩЕНОЇ ТОЧНОСТІ ТА З РОЗШИРЕНИМ ФУНКЦІОНАЛОМ ……..... 281
5.1 Високоточний витратомір біопалив з цифровою обробкою вимірюваної інформації …… 282
5.2 Витратомір біопалив з цифровою обробкою вимірюваної інформації …… 288
5.3 Витратоміри біопалив з підвищеною точністю вимірювання …… 293
5.4 Шляхи вдосконалення термоанемометричних витратомірів біопалив ……. 305
Висновки до розділу 5 …… 316
РОЗДІЛ 6 ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВ В КОНТЕКСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ……... 318
6.1 Прогнозування виробництва і використання біопалива в Україні у процесі та після військових дій …… 318
6.2 Прогнозування екології сталого розвитку …….. 329
Висновки до розділу 6 …… 333
ВИСНОВКИ …… 334
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ……... 337
Додаток А Фізико-хімічні властивості олій рослинного походження, бензину та дизельного палива ……. 361
Додаток Б Коефіцієнт зміни витрати палива ……... 365
Додаток В Методи і засоби вимірювання вират палив …… 366
Додаток Г Акти впровадження результатів дисертаційної роботи ……... 371

Додаток Д Протокол проведення випробувань автомобіля … 376
Додаток Е Публікації здобувача за темою дисертації,
відомості про апробацію дисертаційних досліджень …….. 379

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АДЕ – альтернативні джерела енергії;

АТ – автомобільний транспорт;

АТЗ – автотранспортний засіб;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

АП – альтернативне паливо;

АС – альтернативна сировина;

БВ – блок віднімання;

БД – біодизель;

БЕ – біоетанол;

БКТ – блок керування температурою;

БЛ – блок логарифмування;

БО – блок обчислення;

БП – біопаливо;

БПМ – блок перемикачів;

БС – біологічна складова;

ВАДС – «водій-автомобіль-дорога-середовище»

ВВ – вимірювання витрат;

ВГ – відпрацьовані (вихлопні) гази;

ВІ –вимірювана інформація;

ВП – витрата палива;

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;

ДЖ – джерело живлення;

ДЕ – джерело енергії;

ДН – додаткова норма;

ДНП – динамічна похибка;

ДП – дизельне паливо;

ДТ – діаметр трубки;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ЕРС – електрорушійна сила;

ЗВ – засіб вимірювання;

ЗЗП –зворотне зливання палива;

ЗПП – зворотний потік палива;

КЗВ – коефіцієнт зміни витрат;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

КВ – колінчастий вал;

КВБ – контроль витрати біопалив;

ЛА – лінійна апроксимація;

ЛН – лінійна норма;

МП – мікропроцесор;

НЕ – нагрівальний елемент;

НЖ – напруга живлення;

НП – нейропроцесор;

НМ – нейронна мережа;

НС – навколишнє середовище;

НТЗ – нижча теплота згорання;

ОК – об’ємна концентрація;

ОН – основна норма;

ОРП – олія рослинного походження;

ОТП – осьовий тепловий потік;

ПВ – похибка вимірювання;

ПВВП – похибка вимірювання витрати палива;

ППП – прямий потік палива;

ППС – паливо-повітряна суміш;

ПЧКП –передатне число коробки передач;

РМЕ – ріпаковий метиловий ефір;

РТ – радіальна теплопровідність;

РТП – радіальний тепловий потік;

РТР – робочий температурний режим;

РО – ріпакова олія;

СІТ – середній індикаторний тиск;

ТВ – тепловий витратомір;

ТАВ – термоанемометричний витратомір;

ТЗ – транспортний засіб;

ТНКП – теоретично необхідна кількість повітря;

ТП – термоперетворювач;

ФХВ – фізико-хімічні властивості.

ВСТУП

Актуальність теми. Транспорт України, зокрема автомобільний, є найбільшим споживачем нафтових палив. Водночас велику частину цих палив імпортують. Ціна палива безпосередньо впливає на вартість товарів і послуг всіх сфер діяльності людини. Основними перетворювачами енегії палив на автомобілях є ДВЗ. До початку вторгнення росії в Україну спостерігаляся стійка тенденція збільшення кількості легкових автомобілів з двигунами з іскровим запалюванням. Меншу частину складали автомобіля з дизельними ДВЗ.

Сьогодні важливість диверсифікації використання енергетичних ресурсів для України важко переоцінити. Особливо в умовах війни, що розв’язана росією в Україні, розробка і використання АДЕ і перехід на екологічно чисте паливо стали питаннями державного значення.

Ця проблема має багато аспектів. Йдеться не тільки про пошук альтернативних варіантів для отримання так званих традиційних джерел енергоносіїв, але і про розвиток та використання можливостей альтернативної енергетики з залученням високих технологій та інвестицій, зокрема у біоенергетику. Успіх використання біологічного палива насамперед у таких країнах, як США, Бразилія, країни ЄС тощо все більше переконує у перспективності вкладення грошей в АДЕ, зокрема біогаз, БД, БЕ тощо.

Дійсно, одним із основних векторів можливого вибору альтернативного чистого палива є БЕ, який, завдяки високому октановому числу та сумісності з моторними паливами, використовується як екологічно чистий компонент різних бензинів. Однією з переваг є екологічна чистота як самого виробництва, так і палива з додаванням БЕ, оскільки він розкладається і не забруднює

природні водні системи, а 10% етанолу в бензині знижують токсичність ВГ ДВЗ на 30% [80, 81, 124-126, 137].

В Україні в сфері біоенергетики ухвалено Закони:

- «Про альтернативні види рідкого та газоподібного палива» від 14 січня 2000 року;
- «Про альтернативні джерела енергії» від 20 березня 2003 року;
- «Про внесення змін в деякі закони України відносно стимулювання виробництва бензинів моторних сумішевих» від 23 лютого 2006 року;

Також прийнято цілу низку програмних документів:

- постанова КМУ «Про затвердження програми «Етанол»» № 1044 від 4 липня 2000 року;
- Указ Президента України «Про заходи щодо розвитку виробництва палива з біологічної сировини» № 1094/2003 від 26 вересня 2003 року;
- Указ Президента України «Про рішення РНБОУ від 9 грудня 2005 року «Про стан енергетичної безпеки України та основні засади державної політики у сфері її забезпечення» № 1863/2005 від 27 грудня 2005 року;
- постанова КМУ «Про затвердження Програми розвитку виробництва дизельного біопалива» № 1774 від 22 грудня 2006 року;
- розпорядження КМУ «Про затвердження «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року» № 145 від 15 березня 2006 року.

На жаль, зокрема за об’єктивних обставин, положення вказаних законів і документів виконуються і втілюються в життя не на відповідному рівні.

Вказані Закони та програмні документи передбачають стимулювання виробників автомобілів, машин та інших механізмів, що працюють на АП. Також передбачено надання фізичним і юридичним особам податкових та кредитних пільг, субсидій, гарантій

захисту іноземних інвестицій, що спрямовано на розвиток використання АП.

Треба вказати, що використання АП, крім всього іншого, потребує впровадження методів і засобів контролю його виробництва, зберігання і використання.

В розвинених країнах АТ є основним споживачем БП і його виробництво в світі стрімко зростає. Існуючі методи і засоби контролю за використанням палив сьогодні переважно орієнтовані на традиційні палива для ДВЗ. Тому все більше потребує рішення наукова проблема щодо створення нових перспективних методів і засобів контролю витрат БП (КВБ) АТЗ, які мають надійно працювати в складних дорожніх і траспортних умовах експлуатації. Існуючі витратоміри палив, зокрема і БП, не можуть повною мірою відповідати умовам роботи АТЗ, тому проблема їх удосконалення та створення нових, адаптованих до особливих умов зі збереженням необхідного рівня надійності, точності, пристосовуваності до ФХВ різних БП потребує наукового вирішення.

Отже, однією з гострих проблем в Україні є потреба розширення паливної бази для АТЗ для підвищення ефективності їх експлуатації.

Питанням контролю витрат рідин, нафтових палив та БП на АТ, аналізом їх використання, розробкою засобів контролю витрат присвячено багато зусиль відомих вчених України, серед них: Абрамчук Ф. І., Аулін В. В., Безвесільна О.М., Білинський Й. Й., Бойко П. М., Варфоломєєв В. М., Войтов В. А., Волков В. П., Грабар І. Г., Говорущенко М. Я. Говорун А. М., Гутаревич Ю. Ф, Дорожовець М. М., Захарчук В. І., Зенкін А. С., Карнаух Х. М., Кисіль І. С., Корпач О. А., Кравченко О. П., Кривошапов С. І., Криштопа С.І., Наглюк І. С., Подчашинський Ю. О., Поліщук Є. С., Полянський О.С., Редзюк В. О., Рубців Ю. Ф., Тищенко Л. М.

За кордоном ці питання досліджувалися вченими I. Korobiichuk, M. Nowicki, R. Szewczyk та багатьма іншими.

Зважаючи на обмеженість запасів нафти є важливим рішення щодо розширення паливної бази та використання відновлювальних палив, до яких відносять БП, їхнє виробництво можливе й з відходів харчової, сільськогосподарської, деревообробної промисловості тощо. Найкращим замінником бензину є спиртові палива, зокрема БЕ, який можна використовувати і як домішки до бензину. Об'єми домішок БЕ до бензинів зберігають тенденцію постійного збільшення.

Основною домішкою до ДП можна вважати ОРП та їх похідні, наприклад, РМЕ.

Відомо, що вказані домішки мають різні ФХВ відносно основного палива, тому слід очікувати зміну їх витрат. В процесі експлуатації АТЗ виникає необхідність визначення ВП, що споживаються, які також впливають на собівартість перевезень, викиди токсичних компонентів тощо.

Тому визначення шляхів раціонального використання, обліку і КВБ з різним вмістом різних домішок до бензину або ДП є актуальною науково-технічною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» в редакції № 3534-IX від 21.12.2023; розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року» № 430-р. від 30.05.2018 р. та згідно з планами наукових робіт Національного технічного університету України «КПІ ім. І. Сікорського», державного університету «Житомирська політехніка», Поліського національного університету:

- «Теорія дослідження температурного поля біопалива нового

термоанемометричного витратоміра з використанням алгоритмічних методів, апарату штучних нейронних мереж», (номер державної реєстрації № 0114U000545), 2016 р.

- «Комплексне обстеження пасажиропотоків на маршрутах пасажирського транспорту загального користування в м. Житомир» за договором № 470 від «8» травня 2018 р. (обсяг позабюджетного фінансування 75 тис. грн);
- «Новий прецизійний чутливий елемент стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки» (номер держреєстрації 0118U003152, 2018–2020 рр.).

Розробка наукових основ створення методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів та контролю витрат біопалив належить до основних наукових напрямків кафедри автомобілів та транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка» та кафедри агроінженерії та технічного сервісу Поліського національного університету і виконувалась відповідно до плану науково-дослідних робіт на 2022-2025 р.р.

Мета дослідження: підвищення паливної економічності автомобілів шляхом створення наукових основ і методу контролю витрат рідких біопалив, що враховує зміну ФХВ БП залежно від концентрації біологічної складової (біодомішки) в ньому.

Для досягнення мети в роботі вирішено такі **задачі**:

- провести оцінювання впливу концентрації біодомішки на зміну витрат рідких БП АТЗ.
- обґрунтувати принципи, розробити концепцію умов ефективного використання 1 кг рідкого БП з урахуванням відносної густини біодомішки, відносної НТЗ біодомішки та відносної ТНКП для згорання 1 кг біодомішки;
- провести комплексне оцінювання і системний аналіз існуючих підходів до розв’язання проблеми підвищення точності і швидкодії

вимірювання та КВБ, розширити діапазон ВВ, номенклатуру БП та функціональні можливості використання ТАВ щодо автоматизації процесу вимірювання та контролю;

- обґрунтувати підхід і розробити метод вимірювання та КВБ врахуванням їх ФХВ, сформулювати вимоги ефективного використання обраного методу та засобів контролю;
- обґрунтувати критерії ефективності роботи ТАВ та визначення раціональних конструктивних параметрів його елементів, які розширюють діапазон вимірювання та КВБ, підвищують швидкість і точність вимірювання;
- провести моделювання динамічних процесів ТАВ для різних витрат БП з різною концентрацією БС, обґрунтувати рекомендації використання розподілу температур в радіальному та осьовому напрямках потоку палива для управління паливною економічністю автомобіля;
- провести ідентифікацію динамічних параметрів ТАВ та основних характеристик їх елементів, оцінити адекватність та ефективність розроблених математичних моделей ТАВ автомобілів експериментальними дослідженнями та виробничим випробуванням.

Об’єктом дослідження є: процес контролю витрат рідких біопалив засобами автомобільного транспорту.

Предмет дослідження: наукові основи контролю витрат рідких біопалив, що враховують зміну їх ФХВ залежно від концентрації біодомішки в них.

Наукова новизна одержаних результатів: наукова новизна одержаних результатів полягає в узагальненні та поглибленні наукових основ та у розробці нового методу розрахунку параметрів управління паливною економічністю автомобілів, що дозволяє враховувати зміну фізико-хімічних властивостей біопалив залежно від концентрації біологічної складової (біодомішки) в них, зокрема:

• вперше:

- науково обґрунтовано і експериментально підтверджено доцільність введення нових категорій: відносної густини біодомішки, відносної НТЗ біодомішки та відносної ТНКП для згорання 1 кг біодомішки, що дає змогу підвищити точність контролю витрат біопалив;

- запропоновано нові підходи і розроблений метод оцінювання зміни густини, НТЗ та ТНКП для згорання 1 кг БП залежно від ВП автомобіля, що працює на традиційному рідкому паливі, та витратою палива автомобіля, що працює на БП з відомою ОК БС;

- встановлено взаємозв'язок ФХВ БП з відомою ОК і відомою за властивостями біодомішки та умовою зменшення витрати БП автомобіля, яка дозволяє покращити його показники ефективності експлуатації.

• удосконалено:

- науковий напрям моделювання розподілу температур в потоці палива ТАВ введенням коефіцієнтів, які враховують його конструктивні параметри та ФХВ БП. Запропонований метод відрізняється від існуючих можливостю зменшення випадкових і ДНП вимірювання та КВБ використанням сучасних спеціалізованих НП;

• отримали подальший розвиток:

- метод визначення теплового потоку в трубці ТАВ з урахуванням його конструктивних параметрів (відношення ДТ ТАВ до діаметра НЕ, її матеріалу та РТ ТАВ), що відрізняється від існуючих можливостю вибору параметрів конструктивних елементів, які зменшують похибку ВВ БП;

- метод прогнозування раціональних конструктивних параметрів ТАВ, який відрізняється від існуючих варіюванням послідовно встановлених трубок різних діаметрів, що підбираються певним чином та одночасним аналізом умов їх роботи. Такий підхід дозволяє

отримати підвищення точності і швидкодії вимірювання та КВБ, розширює діапазон ВВ та функціональні можливості ТАВ щодо автоматизації процесу вимірювання та контролю.

Достовірність отриманих результатів забезпечено використанням обгрунтованих методик та засобами числового моделювання, узгодженням розрахунків, виконаних різними методами, відповідністю результатів експериментальних даних теоретичним розрахункам, одержаних автором особисто, з даними інших дослідників.

Практичне значення одержаних результатів

Практична цінність наведених у роботі результатів визначається її спрямованістю на поліпшення ефективності експлуатації АТЗ через підвищення точності та швидкості вимірювання й КВБ. Практичними результатами є:

1. Розроблено метод врахування БС в БП, що з урахуванням її концентрації дозволяє визначати витрату БП АТЗ з відомими конструктивними параметрами, що рухається у відомих умовах на відомих швидкісних та навантажувальних режимах;

2. Доопрацьована конструкція ТАВ шляхом використання нових елементів: зовнішнього ТП, НП з БПМ та ЕОМ, БЛ, ЛА та обчислення витрати, груп ТП по різні боки від НЕ, НЕ на вході в ТАВ з БКТ, трубки ЗПП з БВ, послідовно встановлених трубок різних діаметрів, що підбираються певним чином з одночасним аналізом їх роботи, що забезпечує підвищення точності та швидкодії вимірювання та КВБ, розширення діапазону ВВ, номенклатури палив і функціональних можливостей ТАВ щодо автоматизації вимірювання та контролю;

3. Новизну та практичну цінність пропонованих технічних рішень підтверджено 4 патентами на винаходи, 2 свідоцтвами про реєстрацію авторського права на твір, використання змісту яких дозволяє розв’язувати задачі вимірювання та КВБ з підвищеною точністю та

швидкодією, забезпечує розширення функціональних можливостей ТАВ.

Методи дослідження

Розрахунково-аналітичним методом:

- за допомогою удосконаленої математичної моделі зміни витрат БП (на основі бензину з домішками етилового спирту; на основі ДП з домішками ОРП) ДВЗ, яка дозволяє визначати норми ВП у разі використання бензинів з домішками БЕ різних ОК або ДП з домішками ОРП для АТЗ в реальних умовах експлуатації, *встановлено*, що за збільшення концентрації домішок в паливі, збільшення ВП двигуном АТЗ відбувається, переважно, внаслідок зменшення енергетичної складової БП, в цьому випадку всі проаналізовані біодомішки до основного палива (бензину та дизельного) збільшують витрату БП двигуном АТЗ зі збільшенням їх концентрацій, що потрібно враховувати, вибираючи характеристики засобів КВП;

- *отримано* залежності витрат БП на основі ДП з додаванням 15% та 30% за об'ємом РО в діапазоні швидкостей руху 65–95 км/год автомобіля ГАЗ-33060;

- на основі введених категорій (відносна густина $\Delta\rho$, відносна НТЗ ΔH_u та відносна ТНКП для згорання 1 кг палива ΔL_0) *сформульовано* критерій витрати двокомпонентного палива як суми цих характеристик. *Доведено*, що, в кращому випадку, потрібно використовувати домішки, що мають більшу (відносно основного палива) густину, НТЗ та ТНКП для згоряння 1 кг. *Запропоновано* критерій зміни ВП, який використовуватимуть так: зменшення витрати двокомпонентного палива відбувається у випадку від'ємного значення критерію ВП $\Delta\rho + \Delta L_0 + \Delta H_H$. Кількісне значення ВП залежить від концентрації домішки та визначається запропонованим

КЗВ. Ці характеристики дозволяють аналізувати і обирати потрібний діапазон вимірювання та КВБ;

- *отримано* аналітичні залежності відношення ДТ до діаметра НЕ ТАВ для різних матеріалів трубки, які дозволяють аналізувати вплив РТП на осьовий та, відповідно, зменшити ПВВП. *Запропоновано* для зменшення ПВВП внаслідок зменшення впливу РТП в ТАВ на ОТП (без урахування теплопровідності палива та матеріалу трубки витратоміра) зменшувати діаметр НЕ та збільшувати ДТ ТАВ, а з метою підвищення чутливості ТАВ доцільно використовувати потрібну кількість ТП, яка залежить від величини ВП;

- *проаналізовано* існуючу математичну модель температурного поля в потоці БП, що проходить через витратомір, для визначення основних її складових елементів. *Розроблено* математичну модель визначення РТП в трубці ТАВ з циліндричною стінкою, в яку *введено* котегорії конструктивного коефіцієнта і коефіцієнта РТ ТАВ. *Проаналізовано* їх вплив на величину РТП. *Показано*, що зміна РТП в трубці ТАВ залежить від добутку коефіцієнта РТ, конструктивного коефіцієнта та різниці температур між зовнішньою поверхнею трубки ТАВ та НЕ, причому діаметр внутрішньої поверхні трубки не впливає на величину РТП;

- *проведено* моделювання теплового балансу НЕ в рухомому потоці палива через ТАВ для ідентифікації основних параметрів математичної моделі, від яких залежить точність і швидкодія ТАВ. Аналіз результатів показав: щоб підвищити точність вимірювання ВП ТАВ, потрібно одночасно вимірювати температуру палива у відповідних точках потоку. *Отримано* графічне подання розподілу температур в потоці різних палив для різних їх швидкостей руху (витрат);

- *отримано* математичну модель розподілу температурного поля вздовж трубки ТАВ та *вираховано* уточнене значення витрати БП.

Запропоновано методи підвищення точності та швидкодії ТАВ на основі використання сучасних спеціалізованих НП, які дозволяють компенсувати вплив випадкових і ДНП вимірювання витрат БП;

- *отримано* спрощене рівняння РТП багатокомпонентного палива в ТАВ. *Показано*, що значення коефіцієнта РТ трубки ТАВ для вказаних БП дорівнює значенню теплопровідності нафтового рідкого палива. *Запропоновано* розподіл температур вздовж осі трубки ТАВ подавати як лнійні залежності від значення відстаней до НЕ витратоміра;

- *отримано* залежності температур БП по осі трубки ТАВ з урахуванням їх витрат від відстані до НЕ. *Встановлено*, що, з метою підвищення точності вимірювань та чутливості ТАВ, для бензину, ДП, БЕ, ОРП і різних їх витрат двигуном АТЗ ТАВ повинен мати відношення внутрішнього ДТ до діаметра НЕ $d_2/d_1=3/2$;

- *отримано* залежності відношення ДТ до діаметра НЕ ТАВ для матеріалів трубки різної теплопровідності, що дозволяє зменшити вплив РТП на осьовий і дасть зрештою зменшення ПВВП. *Доведено*, що щоб зменшити ПВ внаслідок зменшення впливу РТП в ТАВ на осьовий тепловий потік, потрібно зменшувати діаметр НЕ та збільшувати ДТ ТАВ (без урахування теплопровідності палива та матеріалу трубки);

- *проведено* оцінювання якості, можливих похибок та невизначеності ВВ БП ТВ. *Зазначено*, що розбіжність результатів, отриманих експериментально, і комп'ютерним моделюванням, можлива внаслідок різних ФХВ (теплопровідність, в'язкість, густина тощо) палива і його властивостей, що задаються в комп'ютерній моделі.

Методом числового ком'ютерного моделювання:

- *визначено* характеристики теплового потоку по осі трубки ТАВ залежно від відстані до НЕ для різних ОК ОРП в ДП для значень витрат БП 5–25 л/год;

- *отримано* залежності температур БЕ, ОРП, ДП та бензину в трубці ТАВ від відстані до НЕ з діаметрами 2, 3, 4 мм в діапазоні витрат 5–25 л/год, які дозволяють визначати числові значення витрат вказаних палив;
- *отримано* залежності температур ДП, ОРП та різних концентрацій ОРП в ДП вздовж осі ТАВ, які дозволяють визначати витрати цих палив АТЗ від 5 до 25 л/год;
- *отримано* графічний розподіл швидкостей та температур теплового потоку в трубці трисекційного ТАВ з послідовно встановленими трубками довжиною 5 см діаметрами 10, 30, 50 см, відповідно. Моделювання проведено для витрат 100 л/год та 200 л/год, температура НС 20 °С, температура палив на вході 10 та 30 °С.

Експериментальним методом:
- *встановлено* залежності часу виходу ТАВ на РТР для струмів через НЕ 0,024; …; 0,12 А та концентрацій РО в ДП 0…100%. *Доведено*, що час виходу ТАВ на РТР для струмів, що проходять через НЕ, з ніхрому та різних концентрацій РО в ДП змінюється в 9,3 раза залежно від величини струму через НЕ та ОК РО в паливі, що потрібно враховувати для побудови алгоритму роботи витратоміра;
- встановлено, що розроблений ТАВ здатний працювати в умовах руху АТЗ з необхідним рівнем надійності, використання його для АТЗ є можливим і потребує додаткових досліджень роботи ТАВ в більш широкому діапазоні дорожніх і транспортних умов експлуатації АТЗ;
- *визначено*, що відносна ПВВП на маршруті руху автомобіля Citroen Berlingo з дизельним двигуном об’ємом 1,9 л, яку визначено за допомогою ТАВ та об’ємним способом, на десяти заїздах в прямому та десяти заїздах в зворотному напрямках на маршруті протяжністю 1,2 км склала 2,8%;

- *встановлено* вплив діаметра НЕ ТАВ на ПВВП автомобіля Сітроєн Berlingo. *Доведено*, що діаметр НЕ в трубці ТАВ впливає на ПВВП, а його зменшення дозволяє знизити цю похибку в 1,2–1,6 раза;

- *отримано* висновок про потребу проведення додаткового дослідження ТАВ з НЕ плоскої спіральної форми, оскільки, ймовірно, запропонована форма НЕ зробить РТП більш рівномірним, що зменшить його вплив на ОТП і, відповідно, на ПВ та КВБ за допомогою ТВ;

- за допомогою ТАВ *отримано* показники ВП легкового автомобіля Сітроєн Berlingo на маршруті руху;

- *отримано* витрати БП на основі ДП з додаванням 15% та 30% за об'ємом РО в діапазоні швидкостей руху 65–95 км/год на стенді з біговими барабанами автомобіля ГАЗ-33060.

Особистий внесок здобувача

Основні результати, що їх наведено в дисертації, поданій до захисту, отримано здобувачем самостійно. Роботи [1-3, 5, 6, 8-10, 11, 14-17, 19, 21-29, 31-34] виконано у співавторстві, роботи [4, 7, 11, 12, 13, 18, 20, 30] – одноосібно.

В роботах, що опубліковано в співавторстві, автору належить:

- аналіз та узагальнення впливу домішок рослинних олій на димність відпрацьваних газів дизельного двигуна [1];

- аналіз впливу фізичних властивостей сажі на процес її відкладання у випускному тракті двигуна автомобіля [2];

- визначення та аналіз впливу домішок олій рослинного походження на димність ВГ дизельного двигуна [3];

- моделювання процесу зміни витрат моторних палив з домішками РО різних концентрацій в ДП [5];

- моделювання теплового потоку в трубці ТАВ, аналіз факторів, що впливають на зменшення похибки вимірювання ВП [6];

- розробка математичної моделі ВП з домішками ОРП та її аналіз, рекомендації щодо зменшення витрат вказаних палив [8];
- проведення експериментальних досліджень зміни витрат моторних палив з домішками РО різних концентрацій, аналіз результатів, формулювання рекомендацій [9];
- розробка алгоритму виходу ТАВ на робочу температуру залежно від складу БП та струму через НЕ [10];
- планування і проведення експериментальних досліджень, розробка і виготовлення датчика провідності БЕ, обробка результатів [11];
- аналіз методів і конструкцій витратомірів щодо використання їх на АТ [14];
- моделювання і аналіз теплових потоків в ТАВ [15–17, 24, 26];
- аналіз шляхів зменшення ПВ і КВП ТАВ [19];
- аналіз даних щодо використання БП в контексті реалізації концепції сталого розвитку [21];
- ідея регулювання температури на вході в ТАВ, розробка алгоритму його роботи, аналіз похибок вимірювання і КВП вказаним ТАВ [22, 23];
- розробка конструкції ТАВ [25];
- аналіз впливу конструктивних параметрів ТАВ на похибку вимірювання витрат БП, розроблення методу її зменшення [27, 28];
- аналіз існуючих засобів та їх конструктивних параметрів вимірювання рідин з погляду можливості їх використання на АТЗ та зменшення ПВ витрат БП [29];
- пропозиції щодо удосконалення ТАВ з метою підвищення точності ВВ БП з різними фізичними властивостями та розширення їх функціональних можливостей, аналіз роботи ТАВ [31–34];

Апробація результатів дисертації

Теоретичні, методичні та практичні положення дисертації доповідались на конференціях, семінарах, симпозіумах та подані у вигляді тез:

- міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури», м. Київ, 5-7 грудня 2023 р.;
- XXXI науково-практичної міжвузівської конференції, присвяченої Дню університету, м. Житомир, 14-16 березня 2006 р.;
- XXXIII науково-практичної міжвузівської конференції, присвяченої Дню університету, м. Житомир, 18-19 березня 2008 р.;
- Proceedings of the International Scientific Conferens «Mechanics 2006», Rzeszow University of Technology, July 2006;
- VI науково-практичної конференції, присвяченої 100–річчю з дня народження академіка С.П. Королева «Практична космонавтика і високі технології», м. Житомир, 9-11 січня 2007 р.;
- XI міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», м. Вінниця, 13-14 квітня 2023 р.;
- XII міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», м. Вінниця, 16-18 квітня 2024 р.;
- XIII міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», м. Вінниця, 15-17 квітня 2025 р.;
- всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки. Житомир, 13-14 травня 2015 р.;
- всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, м. Житомир, 10-12 травня 2017 р.;

- The National Conferens with International Participation Automobile, Environment fnd Agricultural Machinery «AMMA 2002», Cluj-Napoca, october 2002;

- міжнародної науково-практичної конференції «Синергетика, фрактали і новітні технології», м. Житомир, 3-4 червня 2024 р.;

- IV Всеукраїнському науково-практичному онлайн-семінарі «Підвищення якості продукції машинобудівних та ремонтних підприємств», м. Харків, 29 травня 2025 р.;

- міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців», м. Харків, 19-20 жовтня 2017 р.;

- VII-ої міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми розвитку транспорту і логістики», м. Одеса, 26-28 квітня 2017 р.;

- міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології розвитку автомобільного транспорту», м. Харків, 16-19 жовтня 2018 р.;

- International Conference on Sustainable Materials and Energy Technologies, 12-13 September, Coventry UK, 2019;

- I International Scientific and Practical Conference «Dynamics of the development of world science», Vancouver, Canada, 25-27 September, 2019;

XIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», м. Житомир. 26-28 жовтня 2020 р.;

- XV міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», м. Житомир, 24-26 жовтня 2022 р.;

- XVII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», м. Житомир, 21-23 жовтня 2024 р.;

- всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвячена Дню науки, м. Житомир, 15-17 травня 2019 р.;

- X міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», м. Вінниця, 23-25 жовтня 2017 р.;

- XVI міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», м. Вінниця, 23-25 жовтня 2023 р.;

- 78-й наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів НТУ, м. Київ, 2022 р.;

- 79-й наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів НТУ, м. Київ, 2023 р.;

- конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем», м. Рівне, 19-20 жовтня 2022 р.;

- міжнародної конференції «Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів і машин», м. Київ, 16-17 листопада 2022 р.;

- міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури: виклики воєнного часу» м. Київ, 14-16 грудня 2022 р.;

- міжнародної науково-практичної конференції «Auto-TRAK-2023», м. Київ, 4-5 травня 2023 р.;

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 30 наукових працях (21 статті у фахових виданнях України (з них 8 – одноосібно)), 7 – внесених до наукометричної бази Скопус, 2 – в іноземних періодичних виданнях (IndexCopernicus та GScholar)) та 30

-х тезах науково-технічних та науково-практичних конференцій. Отримано чотири патенти на винаходи.

Структура й обсяг роботи. Робота складається зі вступу, шости розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 392 сторінки, з яких основний текст займає 257 сторінок і 9 сторінок, площа яких повністю зайнята рисунками та таблицями. Робота ілюстрована 78 рисунками, наведено 37 таблиц. Список використаних джерел становить 188 найменувань на 24 сторінках. Додатків 6 на 31 сторінці.

РОЗДІЛ 1
СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ

Відомо, що носії енергії та їх джерела поділяють на відновлювальні та невідновлювальні. До відновлювальних відносять такі, що фактично не зменшуються кількісно. Невідновлювальні джерела та носії – які виснажуються та відновлення їх неможливе. Практично всі дослідники зазначають велику роль відновлювальних ДЕ в забезпеченні людства різними її видами, водночас частка відновлювальних ДЕ постійно неухильно зростає.

1.1 Системний аналіз науково-практичного досвіду застосування біопалив

Аналіз використання БП як джерел електричної енергії показує, що вони займають лише шість відсотків серед всіх інших джерел, що придатні для її отримання (рис. 1.1). Потрібно вказати, що використання БП є дуже привабливим для АТ як альтернатива світлим нафтопродуктам. Так, наприклад, для отримання БП марки БІО-100 на основі бензину А-80 потрібно замістити в ньому, орієнтовно, 48% за об’ємом БЕ. БД марки Б-40 має 40% за об’ємом біологічної домішки.

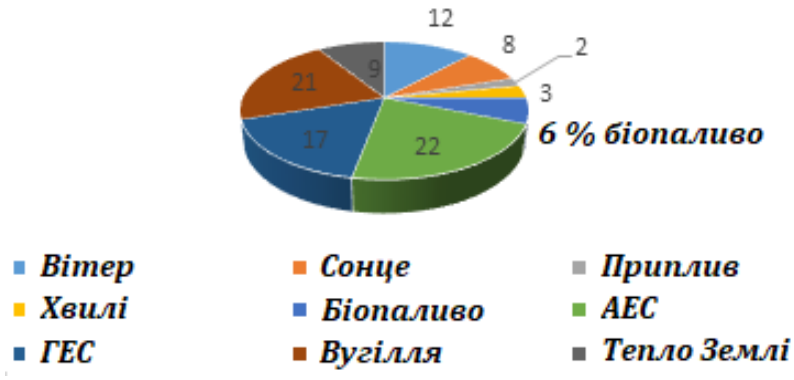


Рисунок 1.1 – Світовий баланс енергоресурсів [67]

БП належить до відновлювальних ДЕ, які мають суттєві переваги перед невідновлювальними. Це відсутність (суттєве зменшення) викидів шкідливих речовин (особливо парникових газів) та практично необмежені ресурси щодо отримання.

В той же час БП мають недоліки: вони, хоч інесуттєво, але впливають на НС, пов'язані з сезонністю отримання, залежать від природно-кліматичних та погодних умов, займають великі посівні площі.

За інформацією Укрінформ у 2023 році, порівняно з попередніми роками, спостерігалось зростання споживання ДП та зменшення споживання бензину на 16%. Ймовірно це пов'язано з повномасштабним вторгненням росії в Україну [67].

Сьогодні, незалежно від подій, що відбувались та відбуваються в світі, спостерігається тенденція зростання виробництва БД (рис. 1.2). Це говорить про розуміння спеціалістів всіх галузей виробництва та транспорту важливості його використання, що позитивно впливає на енергетичний баланс та розподіл енергетичних ресурсів.

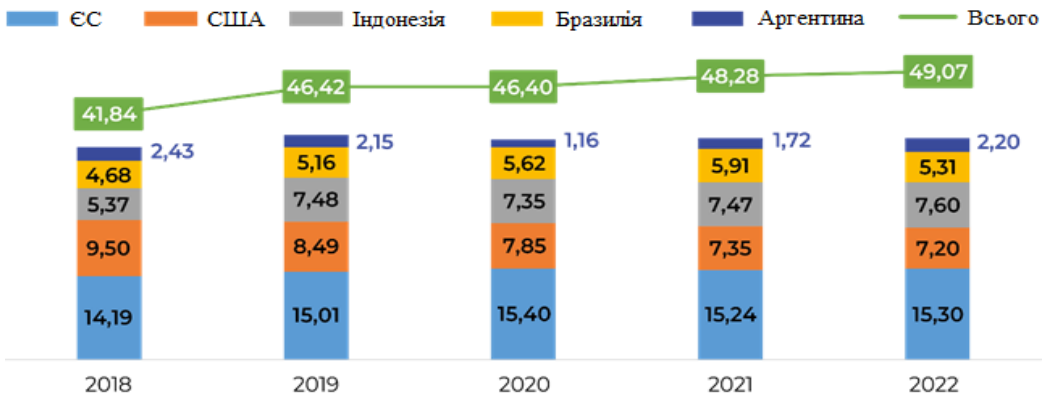


Рисунок 1.2 – Світове виробництво БД, млн т [67]

Одним з джерел отримання БП є промислові та побутові відходи, які містять в собі органічну складову. Це біомаса, яку використовують не лише для отримання електричної енергії, але і як

паливо для АТЗ, що мають ДВЗ. Таке використання сприяє покращенню екологічної ситуації. Біогаз, порівняно з іншими видами палива, має важливі переваги: нульовий баланс викидів вуглекислого газу, зменшені викиди оксидів азоту, моноокису вуглецю та діоксиду сірки. Як недоліки треба вказати: великий діапазон вологості та низька щільність сировини, що робить складним процес переробки; нижча теплота згорання; у більшості випадків сезонна доступність. Нині в світі спостерігається нестача ДП, оскільки попит випереджає можливості нафтоперебних потужностей. Ситуацію посилює скорочення видобутку нафти лідерами ОПЕК+, що призвело до підвищення цін на ДП.

Промисловість також зазнала впливу пандемії Covid-19, коли потреба в паливі була низькою; відбулось скорочення кількості підприємств-виробників світлих нафтопродуктів.

Все частіше звучать прогнози про дефіцит ДП. Ці події торкнуться і ринку України, оскільки нині він практично повністю залежить від ринку ЄС та США. Крім того, в зв’язку з повномасштабним вторгненням росії, Україна зараз має утруднену логістику постачань рідких палив, які, переважно, завозяться АТ, тому все більше уваги треба приділяти АП, якими і є БП.

Треба зазначити, що процеси виробництва та використання відновлювальних енергетичних ресурсів, до яких відносять БП, мають не тільки економічну, соціальну та екологічну складові, а також сприяють сталому розвитку економіки [21, 75].

Отже, можна стверджувати, що використання БП займає важливе місце в енергетиці країн, споживання біопалив щороку зростає, а їх використання як палива для автомобільних двигунів актуально не тільки з енергетичного погляду.

Україна має великій потенціал та непогані перспективи виробництва та споживання БП, особливо сьогодні в складних умовах

війни, їхнє використання має дуже велике значення не тільки в контексті сталого розвитку. Це стосується не лише розвитку аграрного сектора, а й має велике соціально-економічне, екологічне, політичне значення для всієї країни. Індустрія БП пропонує пов'язана з виробництвом БЕ, який може використовуватись як паливо на АТ, сприяти підвищенню ефективності його експлуатації. Однак сьогодні потенціал з виробництва БЕ в Україні ще не повнюстю використовується. Якщо звернути увагу на вирішення цього питання в країнах ЄС, то Україна ще далеко від повноцінного використання власного потенціалу біоресурсів. Україна в умовах повномасштабного вторгнення росії імпортує нафтопродукти, тому спеціалісти АТ наполегливо рекомендують переорієнтуватися на виробництво БП. Бажано прагнути до істотної зміни на вітчизняному ринку БП.

За останні декілька років спостерігається постійне зростання цін на палива нафтового походження, що призводить до підвищення експлуатаційних витрат в сфері транспорту. Відомо, що основним споживачем БП в галузі транспортру є АТ, отже, зважаючи на поступове виснаження запасів нафти в світі, можна спрогнозувати подальше зростання цін на традиційні моторні палива нафтового походження. Крім того значне забруднення НС шкідливими речовинами вимагає зниження токсичності ВГ двигунів АТЗ.

Перспективним напрямком вирішення цієї проблеми вважається заміна традиційних моторних палив нафтового походження АП біологічного походження, тобто БП [65]. БП мають низку переваг порівняно з традиційними мінеральними. Основні з них:

- можливість виробництва з відновлюваної сировини і сільськогосподарських продуктів;
- вуглецева нейтральність;
- повна біологічна розчинність за атмосферних умов (екологічність).

Перспективи використання БП пов’язані з їх виробництвом і особливо використання БП на АТ для країн-імпортерів нафти, до яких належить Україна. Протягом перших півроку від серпня 2022 року Україна збільшила імпорт ДП і бензину у 12 разів. Сьогодні 95% бензину та 72% ДП Україна імпортує з країн ЄС, це переважно такі країни: Румунія, Литва, Словаччина, Греція, Болгарія, Польща [76].

Треба також враховувати, що в Україні природно-кліматичні умови дуже сприятливі для вирощування сільськогосподарських культур, придатних для виробництва БП, наприклад, ріпаку.

Використання як БП неперероблені РО для серійних ДВЗ неможливе, оскільки вона має неоднорідний хімічного склад, значний вміст води та інших різних домішок, високу густину та в’язкість. Щоб її використовувати в серійних ДВЗ БП, потрібно проводити хімічну переробку РО. Цей процес називається трансетерифікація. Його проводять між рослинними оліями та одноатомними спиртами за наявності каталізаторів (рис. 1.3).

В процесі реакції трансетерифікації тригліцериди рослинних олій вступають в хімічну реакцію зі спиртами, в результаті яких утворюються складні ефіри та гліцерин. Якщо рослинна олія ріпакова, кінцевий продукт реакції – метилові або етилові ефіри РО, тобто БД.

Бензин, що продається в країнах ЄС, містить, здебільшого, 5% БЕ. Бензин марки Е5 має 5% етанолу за об’ємом. В ЄС більшість бензинових автомобілів з 2000 року випуску пристосовані до роботи на бензині Е10, що містить до 10% етанолу. Це БП можна використовувати приблизно в 90% усіх АТЗ з бензиновими давигунами, що знаходяться в експлуатацію в країнах ЄС. За таких обставин з кожним роком кількість автомобілів з бензиновими двигунами, які здатні без переобладнання працювати на бензині з вмістом етоналу до 10%, зростає. Наприклад БП Е10 становить 32% від обсягів продажу палив для бензинових двигунів у Франції, 63% –

у Фінляндії, в Німеччині – перевищує 12,6%. Треба зазначити, що невеличка різниця вмісту БЕ у вказаних БП не дає істотної різниці у вартості та їх витраті [77].

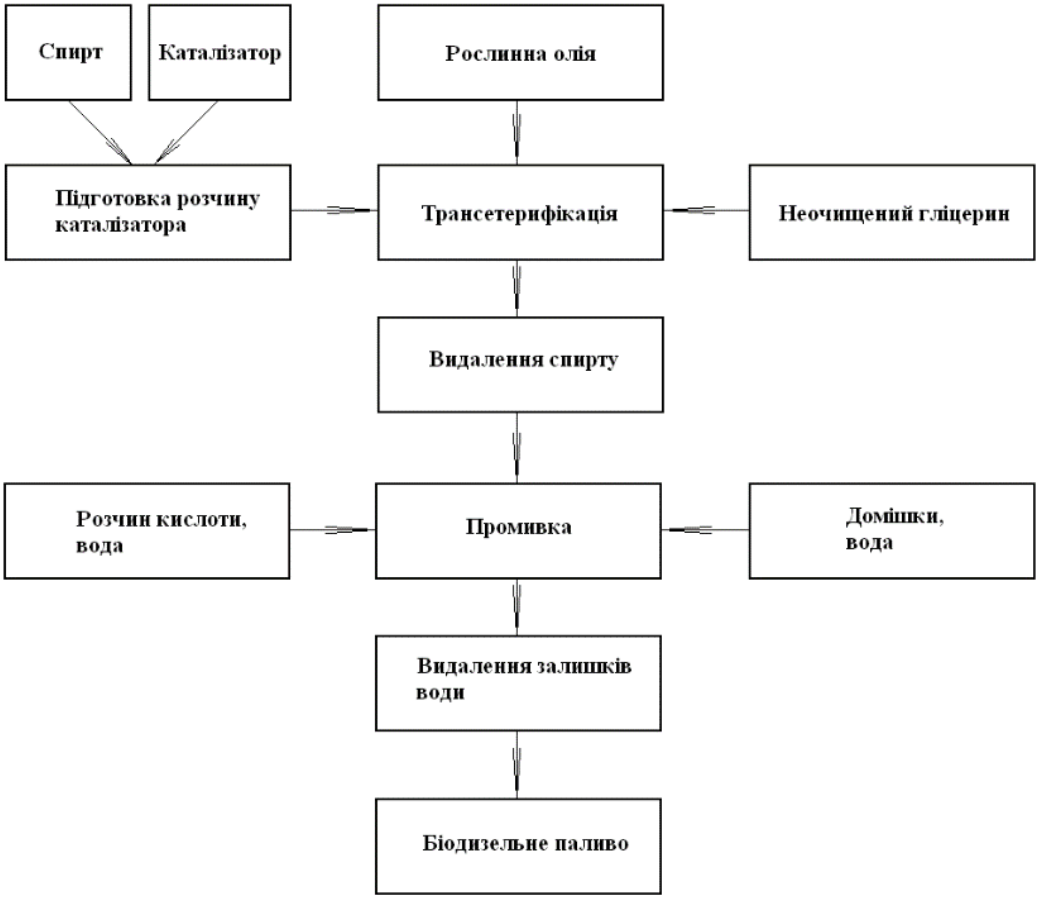


Рисунок 1.3 – Схема процесу трансетерифікації

Авторська розробка.

Країни ЄС мають достатньо високі потужності виробництва БЕ (рис. 1.4).

Багато років тому у Верховній раді України був зареєстрований проєкт закону, який передбачав норму домішки БЕ в БП, що є на ринку країни. Передбачалося, що з липня 2020 року вміст біодомішок до бензину має становити не менше 7% за вагою. Зрозуміло, що ці плани змінила пандемія, а зараз їх втіленню в життя заважає війна з росією. Причому, за невиконання цих вимог передбачались штрафні

санкції. На той час це відкривало гарантований ринок збуту БЕ 350 тис. т в рік.

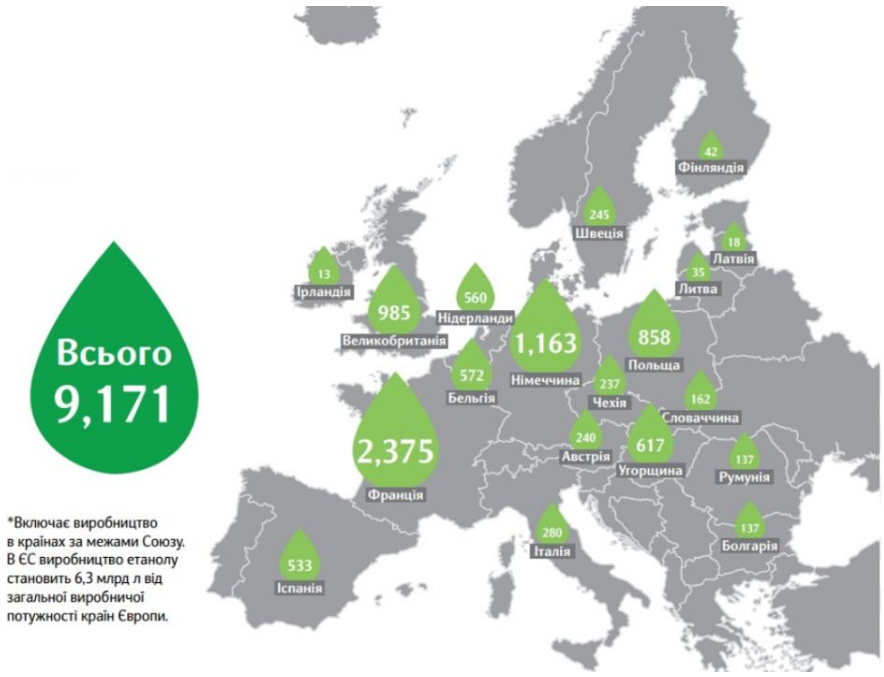


Рисунок 1.4 – Потужності виробництва БЕ в країнах Європи всього 9,171 млрд л (в країнах ЄС 6,3 млрд л) [77]

Нині в Україні є приблизно тринадцять виробників БЕ. Активно працюють Гайсинський, Зарубінський, Фазор та Екоенергія, Гнідавський та Узинський цукрові заводи, які виробляли близько 80 тис. т БЕ для отримання БП (рис. 1.5.). Якщо прийняти за обов'язковий вміст БЕ в бензині в 5%, попит в Україні на нього складе до трьохсот тисяч тонн.

Найбільш привабливою та розповсюдженою сировиною для виробництва БЕ в Україні є меляса та кукурудза. Якщо виробляти цукру 2 млн т/рік, обсяг виробництва меляси складе близько 500 тис. т, 100 тис. т з яких іде на виробництво дріжджів, а 400 тис. т – на БЕ та спирт. Із залишків меляси реально отимати приблизно 100 тис. т БЕ [77]. Також в Україні приватним мелясним заводам з виробництва БЕ можуть створити конкуренцію заводи з переробки зернових відходів.

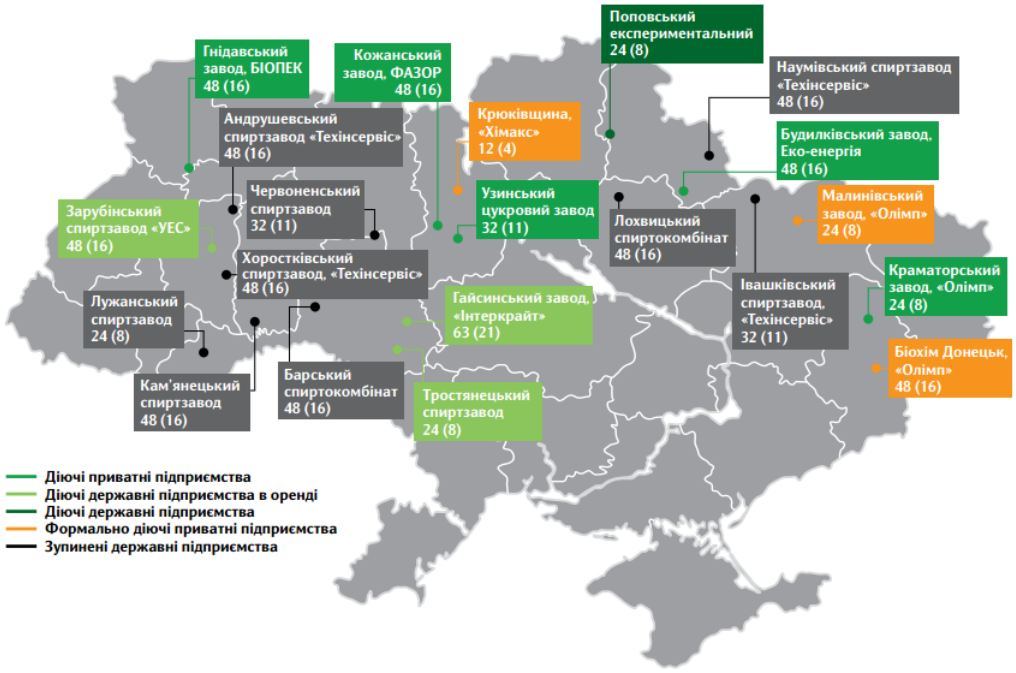


Рисунок 1.5 – Виробники БЕ в Україні [77]

Таблиця 1.1 – Сировина для отримання БЕ в Україні [77]

Сировина	Характеристика сировини	Витрати сировини, т/т етанолу	Вартість сировини (без ПДВ), євро/т
Суха кукурудза	Крохмаль 65%	3	120
Сира кукурудза	Крохмаль 65%	3	100
Меляса	Цукор 46%	3,8	59,3
Пшениця	Крохмаль 50%	3,4	150
Бій зерна	Крохмаль 50%	3	80

Приблизно 85% етанолу, що виробляється в світі, має технічне призначення, зокрема 80% використовують як БП, за цих обставин в останні роки на ринку спостерігається постійне зростання вироництва паливного БЕ. Свої корективи вносила пандемія, але експерти прогнозують найближчим часом підвищення використання етанолу до 120 млрд л/рік.

Нині частка БЕ в паливі для бензинових двигунів в США та країнах ЄС складає 10%, в Бразилії – 24%. На жаль, в нашій країні цей показник дуже низький, а в умовах війни він став меншим (1%). До

2020 року, згідно з Директивою ЄС 2009/2028/ЄС, норма вмісту БЕ в автомобільному паливі не мала бути меншою за 10%.

До 2020 року в Україні очікувалося довести виробництво БЕ в обсязі не менше 400 тис. т. Гнідавський цукровий завод є одним з провідних в Україні у сфері інноваційних проєктів, одним із яких є проєкт «Біопаливно-енергетична компанія». Завод виробляє БЕ та органічні розчинники.

Додавання БЕ до бензину не тільки сприяє покращенню незалежності держави, а також зменшує викиди парникових газів. Також треба зазначити, що такий підхід сприяє економічному розвитку країн, що доводять сьогодні Бразилія та Америка, які є лідерами в цій галузі. Потрібно підкреслити, що в Україні вирощування та переробка буряків, виробництво цукру – це відкритий незамкнений виробничий цикл. А потрібно вирощувати та переробляти буряки, отримувати з них цукор, далі отримувати БЕ, біогаз, електроенергію, які знову використовувати у виробництві, отримувати стоки і повертати їх у землю. Це, безумовно, потребує державної підтримки, щоб Україна отримала ефект сталого розвитку.

В Україні є всі умови та потужності для виробництва БЕ, існує відповідна нормативна база щодо його використання як БП, розроблено низку вітчизняних технологій переробки БЕ в кисневмісну домішку до палив. Застосування БЕ та його похідних в Україні відповідало б світовим принципам використання відновлюваних енергетичних ресурсів. Також потребує уваги виважена та правильна державна політика щодо встановлення акцизу на БП, запровадження пільгового кредитування для розвитку додаткових потужностей з їх виробництва.

Не зважаючи на складну поточну ситуацію в світі, коли цивілізовані суспільства після важкої пандемії коронавірусу зіткнулися з ще одним викликом – вторгненням росії в Україну, ринок

БП в цілому, і зокрема БД, продовжує активно розвиватися. Волатильність цін (показник, що характеризує тенденції зміни ринкових цін і доходів в часі) на ОРП, зниження на світовому ринку пропозицій стосовно соняшниковій олії після практично виходу з нього України, яка була донедавна основним її постачальником, інфляція та прогнозування проблем з продовольчою безпекою породили велику кількість протиріч та суперечок щодо доцільності розвитку галузі БП нині. Важливою є думка про необхідність подальшого поступового зменшення залежності від нафтових видів палив та збереження екологічного курсу споживання енергії в світі. Тому можна очікувати і подальше зростання світового виробництва БД, особливо в таких країнах, як США, ЄС, Індонезія та Аргентина (рис. 1.6) [67].

Має місце цікавий факт, а саме: Україна займає третє місце (після Франції та США) за експортом БП до Великої Британії, який за звітом її уряду в 2013/2014 склав близько 150 млн л. У той же час компанія Shell (Велика Британія) продає БД назад в Україну [74, 75].

Основною сировиною для БД є пальмова, соєва та РО, а також можуть використовуватись різні олії та жири, зокрема відпрацьована харчова олія (рис. 1.6).

Рішення щодо підвищення відсоткового вмісту БД в паливі зумовлюється прагненням скоротити запаси пальмової олії в Індонезії, які утворились в період, коли в країні діяла заборона на експорт цього продукту. Влада країни ставила за мету контролювати ціни на всі харчові олії та забороняла експорт ключової для країни олії, що призвело до збільшення її запасів на ринку та невдоволення фермерів. В результаті заборону зняли і збільшення виробництва БП стало виходом з ситуації щодо великих запасів олії, що також дозволило зменшити витрати на імпорт інших видів палива. Додатково влада повідомила про плани випробувань БП марки В40.

За оцінками спеціалістів країни, якщо запровадити використання цього палива, можна спрямувати на його виробництво приблизно 2,5 млн т пальмової олії.

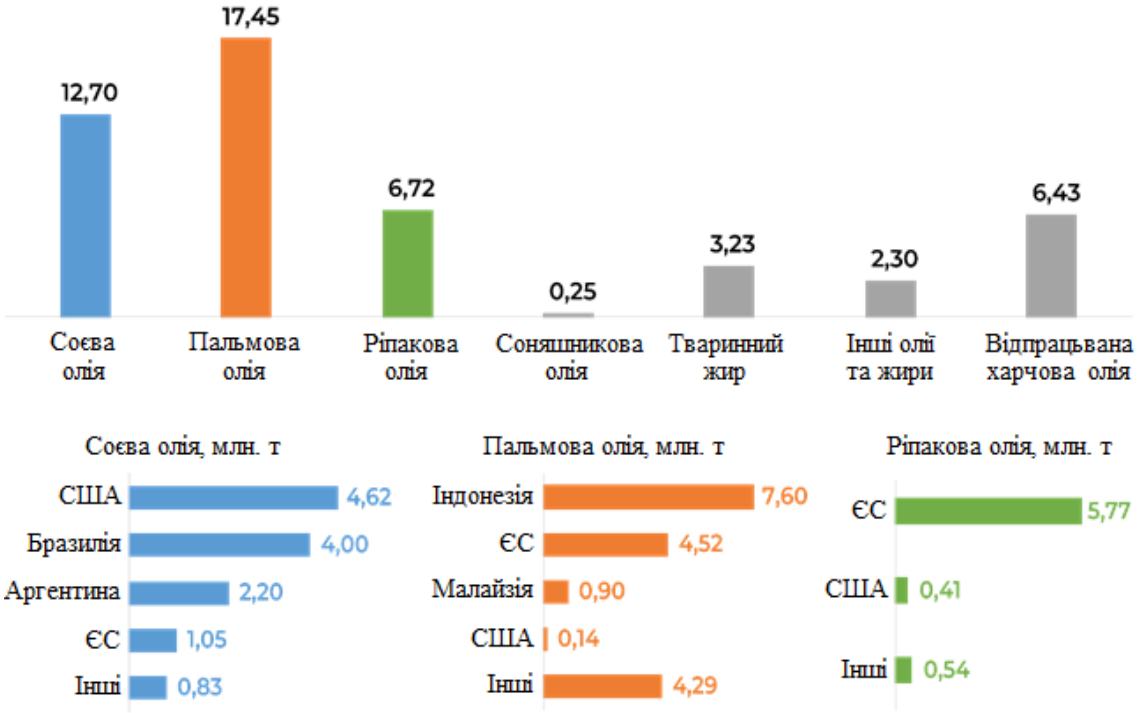


Рисунок 1.6 – Використання сировини для виробництва БД станом на 2022 рік, млн т [67]

Спеціалісти Oil World прогнозують, що покращення цінової конкурентоспроможності стимулюватиме подальше збільшення експорту БД з Індонезії. Для збільшення експорту завадою стає мито країні на експорт БД. Ще в травні 2021 року експорт продукції з Індонезії досяг максимального значення за останні 9 місяців, склавши 21 тис. т, що на 52% перевищило цей показник за аналогічний період 2020 року. Останнім часом на більш активне використання БД спрямована політика Аргентини. За даними Oil World в 2023 році нестача ДП в країні призвела до підвищення попиту на БД з 5 до 12,5%, що відповідає споживанню 120–130 тис. т/місяць, а це

приблизно відповідає зростанню внутрішнього споживання БД в два рази [67].

Виробництво БД в Аргентині в 2022 році склало 2,2 млн т, що на 0,5 млн т перевищує аналогічний показник 2021 року, а експорт БД країни прогнозується на рівні 1,4 млн т (рис. 1.7).

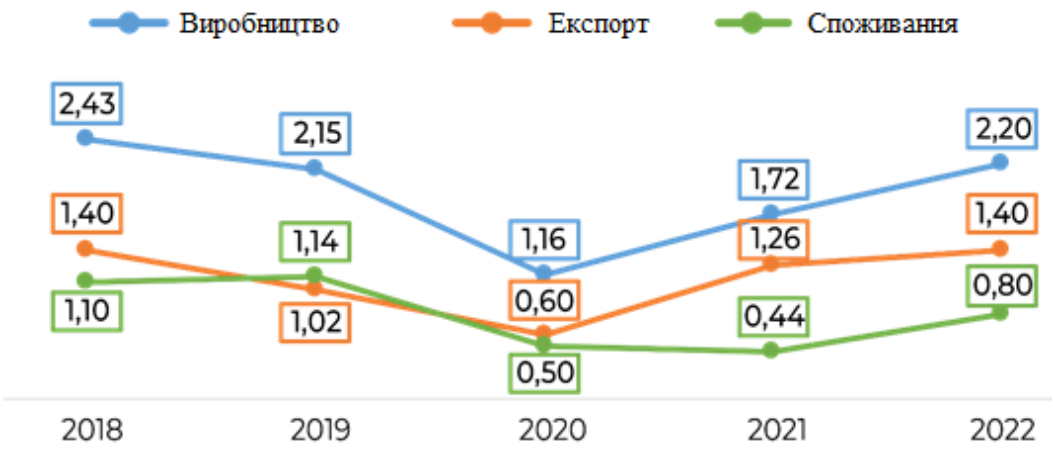


Рисунок 1.7 – Виробництво і розподіл БД в Аргентині, млн т [67]

В США зростає виробництво та імпорт БД (рис. 1.8). За побоювань світової продовольчої кризи виникають думки щодо збільшення виробництва БП. Не зважаючи на це, влада США прийняла рішення дотримуватися ідеї збільшення виробництва БД, оскільки це знижує потреби в нафтовому паливі. Також актуальним для країни залишаються екологічні питання. Прогноз аналітиків Oil World показує збільшення випуску БД на 1 млн т щорічно, тобто до 9,5 млн т. Наприклад, в перші 5 місяців 2021 року у США спостерігалося збільшення виробництва гідрогенізованої олії (HVO) приблизно вдвічі (до 1,8 млн т) порівняно з аналогічним періодом 2020 року. Це збільшення компенсувало зниження випуску БД (до 2,1 млн т). За умов подальшого виробництва цих двох видів БП на рівні приблизно 0,8 млн т/місяць загальний показник може суттєво зрости.

Аналіз показує, що, стосовно імпорту в США в 2022 році, в перші п’ять місяців постачання БД та HVO склало 279 тис. т і 696 тис. т, відповідно. Це перевищує аналогічні показники за 2021 р. (відповідно, 207 та 677 тис. т).

Щодо країн ЄС (рис. 1.10), то виробництво БД у 2022 році фактично не збільшилося. Спеціалісти Oil World оцінюють зміну цього показника з 15,24 млн т у 2021 році до 15,3 млн т. Водночас, основні країни-виробники (Іспанія та Франція) такої продукції підвищують обсяги її виробництва.

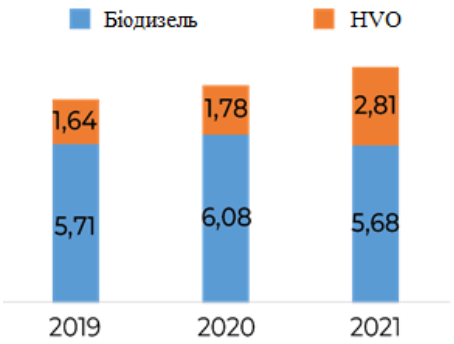


Рисунок 1.8 – Виробництво БД і HVO в США, млн т [67]

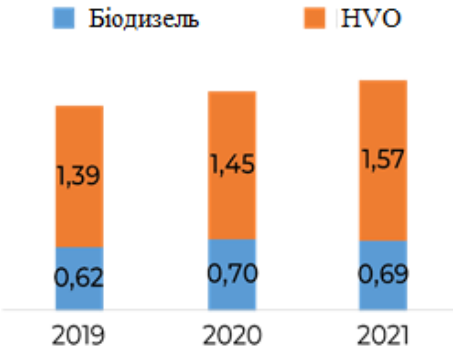


Рисунок 1.9 – Імпорт БД і HVO в США, млн т [67]

Аналітики вказують на: позитивний ефект стосовно використання БД через підвищення вимог до його використання в деяких країнах ЄС, відновлення економік після пандемії, дисбаланс попиту та пропозиції, розв’язану росією війну в Україні.

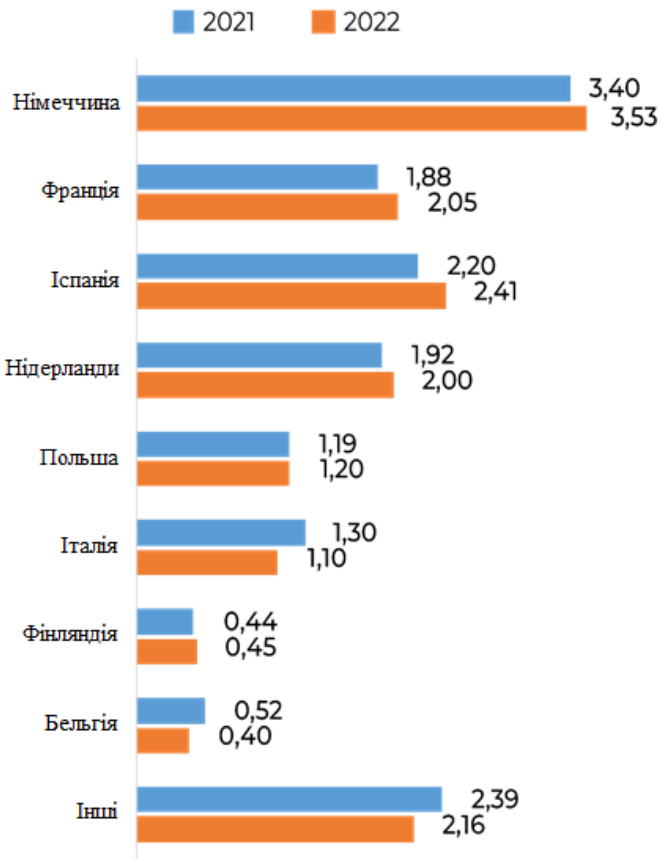


Рисунок 1.10 – Виробництво БД в країнах ЄС, млн т [67]

Загалом можна відзначити оптимістичні перспективи розвитку промисловості БП в багатьох країнах світу. Але потребують постійної уваги питання впливу на цей розвиток військового вторгнення в Україну, світової продовольчої безпеки, інфляції, волатильності цін, які за негативним сценарієм можуть вплинути на доцільність впровадженняі процесів використання БП в конкретних соціально-економічних умовах.

Аналітики доводять, що війна в Україні впливає на світову продовольчу безпеку через здорожчання рослинних олій. Внаслідок збільшення собівартості виробництва БД в ЄС існує конкуренція з боку імпортної продукції, що є несприятливим фактором виробництва БД. Крім того, Україна була традиційним постачальником соняшнику, сої, ріпаку та соняшникової олії до країн ЄС, але з початком війни їх експорт утруднений, а при ускладненні

експорту варто зосередитись на питаннях внутрішньої переробки і споживання рослинних олій, що позитивно вплине на економіку України, яка сьогодні імпортує практично 100% світлих нафтопродуктів.

Також експерти зазначають, що сприятливим фактором на початку 2022 року для збільшення попиту на БП було зняття обмежень, які вводились у зв'язку з пандемією коронавірусу, однак у 2023 році цей чинник був менш впливовий, ніж у 2021 році. Крім того, відновлення роботи закладів громадського харчування створило більш доступною відпрацьовану харчову олію, яка є сировиною для БД.

Основною сировиною для БД в країнах ЄС є ріпакова і пальмова олії (рис. 1.11), а найбільшим споживачем БД є АТ. Близько 45% такого БП використовують для вантажних АТЗ, 50% – в суміші з ДП, інші 5% – у фермерських господарствах.

Зараз в Європі найбільш поширена суміш дизельного і біодизельного палива у співвідношенні 9/1.

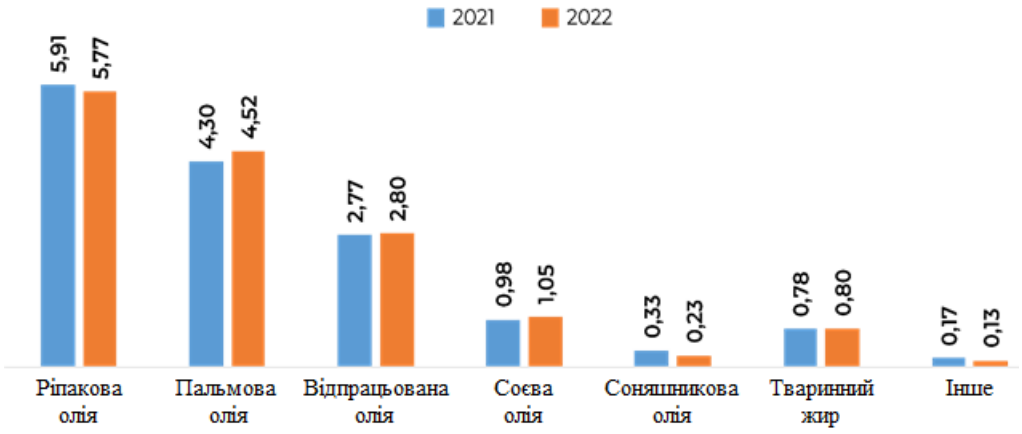


Рисунок 1.11 – Сировина для виробництва БД в країнах ЄС, млн. т [67]

Україна входить в першу пятірку країн в світі з виробництва технічної коноплі та може використовувати відходи коноплі для виробництва БП (також БД).

Основною сировиною для БД є ріпакова, пальмова та відпрацьована олії (рис. 1.11).

Отже, використання БД в ДВЗ АТЗ дозволяє знизити обсягі споживання традиційних палив нафтового походження.

1.1.1 Особливості контролю витрат палив на підприємствах автомобільного транспорту

В процесі визначення фактичних потреб і здійснення розрахунків нормативних ВП, особливо за високих швидкостей руху автомобіля (вище за 70 км/год), потрібно враховувати, що витрати енергії зі збільшенням швидкості зростають нелінійно. Пропорційно квадрату швидкості зростають кінетична енергія автомобіля і шлях гальмування.

Потрібно також враховувати, що стиль керування АТЗ впливає на ВП, яка може збільшуватись до 30%, причому це відбувається без суттєвого збільшення середньої швидкості руху по місту. А економний стиль водіння дає змогу заощаджувати до 30% палива. Саме тому, з метою економії палив, зменшення впливу АТЗ на НС та людей, сприяння покращенню безпеки, рекомендується встановллювати максимально та мінімально можливі значення коефіцієнтів коригування норм ВП.

Фактичні нормативи ВП рекомендується встановлювати за звітністю суб’єкта, даними тахографів та GPS-моніторингу тощо з фіксацією фактичних умов та режимів роботи АТЗ.

В процесі експлуатації АТЗ на постійно визначених маршрутах та в однакових умовах руху обґрунтування значень коригувальних коефіцієнтів на заданий період часу може бути наведено в окремому

звітному документі за результатами проведених власних досліджень конкретних умов експлуатації АТЗ. Випадкові фактори та відповідні їм коефіцієнти коригування потребують окремого обґрунтування для застосування в процесі розрахунку норм ВП.

Щоб отримати фактичну ВП методом доливання баку до повного, обов'язково виконують умови:

- доливання проводять на горизонтальній ділянці з застосуванням одного вимірювального приладу;
- за пробіг або час роботи АТЗ витрачається не менш 30% палива з паливного баку (для зменшення ПВ рекомендовано відпрацьовувати більше 50% об'єму).

Рекомендується створювати комісію для перевірки технічного стану АТЗ та їх експлуатації відповідно до рекомендацій виробника.

На підприємствах АТ важливо впровадити належне обґрунтування системи визначення коефіцієнтів коригування, нормативів і норм ВП залежно від конкретних можливостей проведення обліку та управління експлуатаційними ВП.

1.2 Фізико-хімічні властивості компонент біопалив та їх вплив на роботу двигунів внутрішнього згорання

Густина ОРП знаходиться в межах 900–980 кг/м^3, показник заломлення 1,44–1,48. Вони розчиняють гази, сорбують леткі речовини та ефірні масла. Також властивістю вказаних компонент є розчинність в органічних розчинниках (ацетоні, бензині, бензолі, гексані, дихлоретані, тетрахлорметані, діетиловому ефірі тощо). Це пов'язано з невеликою полярністю триацилгліцеринів і наявністю в їх молекулах довгого вуглеводневого радикала, що збільшує сили взаємодії між триацилгліцеринами та неполярними розчинниками. Метанол і етанол при кімнатній температурі розчиняють олії

обмежено, однак зі збільшенням температури ця властивість зростає. У воді олії практично не розчиняються.

Деякі фізичні властивості різних ОРП наведено в табл. А.1 (додаток А). Важливою властивостю ОРП, яка визначає можливість її використання як палива для автомобільних ДВЗ є температура плавлення – це температура, при якій розплав речовини знаходиться в рівновазі з твердою фазою. Незалежно від того, здійснюють підведення теплоти при плавлінні твердої речовини або відведення теплоти під час охолодження розплаву, рівновага між твердою і рідкою фазами має виникати за однієї температури, тобто температури плавлення і застигання індивідуального сполучення мають бути однаковими. Однак температура застигання жирів, що визначається експериментально, виявляється дещо нижчою температури плавлення. Це пояснюється порушенням термодинамичної рівноваги між рідкою та твердою фазами внаслідок переохолодження ефірів і наявністю кількох компонентів в олії, а також декількох кристалічних модифікацій. Суміші індивідуальних ацилгліцеринів або утворюють тверді росчини, або дають евтектики. Евтектична сумішь має температуру плавлення більш низьку, ніж вихідні компоненти.

Температура плавлення однокислотних триацилгліцеринів збільшується зі зростанням числа вуглецевих атомів в радикалі та зменшенням в ньому кількості ізольованих подвійних зв’язків. Найкращі низкотемпературні властивості (найбільшу рухомість за низьких температур) виявляють олії, що висихають, в складі яких найбільша частка ефірів ліноленової кислоти. Однак ці ж олії вступають в реакції окислення і полімеризації, що негативно позначиться на експлуатаційних властивостях цих палив (утворення нагару, лаків в двигуні; осадів і корозійно-агресивних домішок при зберіганні) [13].

Температура застигання жирних кислот, що їх виділено з досліджуваного жиру, називається титром жиру. Для жирів та багатьох продуктів їх переробки титр є важливим показником, що характеризує жирнокислотний склад речовини. Наприклад, перетворення ненасичених кислот в насичені або цісізомерів в трансізомери в процесі гідрогенізації (реакції приєднання водню по кратних зв'язках) супроводжується значним півищенням титру жиру.

Густина однокислотних триацилгліцеринів зменшується зі збільшенням довжини ланцюга радикала і зростає з ростом числа ізольованих подвійних зв'язків. Для ізомерів зі спряженими подвійними зв'язками густина вища, ніж з ізольованими. Наявність гідроксильних груп (і водневих зв'язків між ними) в жирнокислотному залишку призводить до збільшення густини (касторова олія). Залежність густини олій від температури наведена в табл. А.2 (додаток А).

Відомо, що густина ОРП зі зростанням температури зменшується (табл. А.3, додаток А). В'язкість однокислотних триацилгліцеринів значно вища, ніж відповідних кислот. Для сполук з меншою молекулярною масою або з більшим числом подвійних вуглець-вуглецевих зв'язків вона менша. При нагріванні триацилгліцеринів їх в'язкість зменшується, що відповідає загальним закономірностям для органічних сполук.

Динамічна в'язкість більшості рідких ОРП становить 50–80 МПа·с (при 20 °С). Дуже велика в'язкість касторової (97,6 МПа·с при 50 °С) та тунгової олій зумовлена, в першому випадку, асоціацією молекул за рахунок водневих зв'язків гідроксильної групи, в другому випадку – швидкою полімеризацією сполучених полієнових ацильних груп [70, 96].

За допомогою таких характеристик, як теплоємність, температуропровідність та теплопровідність, оцінюється такий

експлуатаційний показник палив, як властивості щодо охолодження (табл. А.4–А.6, додаток А). Чим більші теплоємність та теплопровідність, тим кращі його властивості щодо охолодження.

Під час проєктування ТВ обов’язково потрібно враховувати властивості палива, витрата якого вимірюється. Деякі властивості сумішевих палив на основі бензину з різним вмістом БЕ наведено в табл. 1.2.

Наявність в сумішевому паливі на основі бензину БЕ впливає на теплопровідність цього палива (табл. А.6, А.7, додаток А), ДП зі зміною температури також змінює свої теплофізичні властивості (табл. А.8, додаток А).

ФХВ БД подібні до традиційного ДП (табл. 1.3). Дослідження, проведені вітчизняними та закордонними вченими, підтверджують можливість застосування БД в дизелях різного типу. Однак зараз переважно використовуються суміші дизельного та біодизельного палив, оскільки самостійне застосування БД ускладнено його відносно високими значеннями кінематичної в’язкості та густини порівняно з ДП нафтового походження.

У процесі роботи ДВЗ на БД має місце зростання ВП як годинної, так і питомої, що викликано більш низькою теплотою згорання БД порівняно з ДП. Підвищуються викиди оксидів азоту за рахунок наявності кисню в молекулі БД та підвищення максимальної температури в циліндрах дизеля, знижуються викиди продуктів неповного згорання та сажі. Важливо зазначити, що за таких умов практично відсутні оксиди сірки у ВГ ДВЗ.

Високе цетанове число біодизельного палива сприяє зниженню «жорскості» роботи дизеля. Висока температура спалаху БД забезпечує задовільну пожежобезпечність в процесі його виробництва та використання.

Таблиця 1.2 – Основні властивості сумішевих палив на основі бензину з різним вмістом БЕ [80]

Показники палива	Бензин	БЕ гідрированний	Бензин + 10% БЕ	Бензин + 20% БЕ	Бензин + 85% БЕ
Елементарний хімічний склад, %					
C,	85,5	52,17	82,17	78,83	57,17
H,	14,5	13,04	14,35	14,21	13,26
O	-	34,78	3,48	6,96	29,57
ТНКП, кг повітря/кг палива, l_0 ($l_{0.сум}$)	14,8	9,06	14,2	13,7	9,9
Питома теплоємність палива, $c_{р.п.}$, МДж/(кг·К)	2,3	2,39	2,31	2,32	2,38
Прихована теплота пароутворення палива, $L_П$, *МДж/кг*	315	922	379	443	836
Прийнята для розрахунків густина палива, $\rho_П$, кг/м³	740	790	745	750	783
Масові частки бензину і БЕ в бензоетанольній суміші:					
$g_б$	1	0	0,894	0,789	0,142
$g_е$	0	1	0,106	0,211	0,858

Продовження табл. 1.2

Зниження температури свіжого заряду внаслідок випаровування палива, $\Delta T_{ВИП}$, °*C* за:					
α = 0,6	28,1	118,4	35,0	42,0	100,5
α = 0,8	22,3	96,1	27,7	33,4	81,2
α = 1	18,4	80,9	22,9	27,7	68,1
α = 1,2	15,7	69,9	19,6	23,6	58,6

Таблиця 1.3 – Порівняння деяких ФХВ БД та ДП [66]

Показник	Одиниці виміру	ДП	БД
Густина (15 ºС)	кг/м^3	820…845	860…900
Кінематичні в’язкість при температурі 40 ºС	мм^2/с	2…4,5	3,5…5
Температура спалаху в закритому тиглі	ºС	55	120
Цетанове число		45…55	120
НТЗ	МДж/кг	41…43,5	37,5
Хімічний склад:			
- карбон С	%	87	77,5
- гідроген H_2		12,6	12
- кисень O_2		0,4	10,5

За результатами досліджень впливу БД на надійність і зносостійкість деталей паливної апаратури дизелів встановлено кращі протизадирні властивості БД порівняно з дизельним, що пояснюється наявністю фосфоліпідів, які, у разі підвищення температури на поверхні тертя, вступають у взаємодію з металом і утворюють

металеві мила, які запобігають зношенню поверхонь, що взаємодіють [68, 69].

Однак наявність в БД залишків води, спирту та механічних домішок викликає розбухання гумових ущільнювачів в системі живлення ДВЗ, збільшує коксування розпилювачів форсунок, скорочує термін служби фільтрів. Усунення вказаних недоліків пропонується заміною гумових ущільнювачів синтетичними, збільшенням продуктивності фільтрів тонкого очищення палива, зменшенням інтервалу планових обслуговувань системи живлення ДВЗ.

1.3 Нормативна база України, що регламентує визначення витрат палив двигунами автомобілів

Процеси визначення та контролю ВП на АТ, формулювання вимог до якості автомобільних палив та їх реалізації регламентує Закон України «Про автомобільний транспорт» від 05.04.2001 № 2344-III [78].

Він встановлює, що автомобільні палива мають відповідати технічним вимогам виробників АТЗ та вимогам, встановлених законодавством. Щодо реалізації автомобільних палив, зазначено, - її здійснюють лише за умов їх відповідності, що має підтверджуватись сертифікатом певного зразка. Водночас реалізація палив проводиться тільки у певних місцях і у встановленому порядку.

В законі України «Про дорожній рух» також зазначено, що підприємства, які виготовляють паливо, мають дотримуватися вимог щодо його якості [82]. А стаття 52-1 цього закону прямо вказує, що до повноважень МВС України в сфері забезпечення безпеки дорожнього руху належать: облік, накопичення, оброблення та використання інформації про ТЗ, що підлягають відомчій і державній реєстрації.

Чинна нині законодавча база не регламентує КВБ, зокрема з різним вмістом БС в них. Відсутні науково обгрунтовані норми цих витрат для всього можливого різноманіття БП як для ДВЗ з іскровим запалюванням, так і для дизелів.

Для обгрунтування витрат вказаних палив сьогодні можна звернутись за послугами до ДП «ДержавтотрансНДІпроект» [84], яке може провести необхідні розрахунки та/або перевірити і встановити їх експериментально. Вказаний заклад пропонує послуги щодо розроблення тимчасових ЛН ВП. Розрахунки норм витрат проводяться з використанням базової норми за формулами, які наведено в [85]. Для моделей АТЗ, що не вхоять в перелік базових норм витрат, встановлюються тимчасові базові ЛН за заявками виробників автомобілів, власників чи користувачів АТЗ.

Підприємством «ДержавтотрансНДІпроект» на основі «Норм витрат палива і мастильних матеріалів на автомобільному транспорті» розроблено методичні рекомендації з нормування ВП [85], які призначено для забезпечення потреб фізичних та юридичних осіб в обліку, плануванні, контролі витрат, звітності, обґрунтуванні створення резервів палива, запровадженні шляхів та інструментів щодо раціонального використання палив, що споживаються АТЗ в експлуатації. Вони можуть використовуватись для розрахунків нормативних ВП АТЗ, перевірки та обґрунтованості таких розрахунків, раціонального використання палив.

Також в ДП «ДержавтотрансНДІпроект» створено та працює Випробувальний центр колісних ТЗ. Цей центр акредитовано відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 та нотифіковано ООН як технічна служба України (E46/B), що має необхідне обладнання для експериментального визначення ВП АТЗ.

Для АТЗ в Україні встановлено такі види норм ВП:

- лінійна базова (на 100 км пробігу);

- на транспортну роботу (на 100 т·км);
- на тонну спорядженої маси;
- на їздку з вантажем (на маневрування у процесі завантаження (розвантаження));
- на виконання спеціальних робіт(л/100 км);
- на годину роботи спеціального обладнання;
- на годину роботи автономного обігрівача.

Базова ЛН *Hs* на 100 км пробігу встановлюється для:
- споряджених вантажних автомобілів (крім самоскидів);
- автобусів та легкових автомобілів повною масою до 3,5 т та самоскидів з навантаженням 50%;
- автобусів з повною масою з повним навантаженням більше 3,5 т;
- споряджених вантажопасажирських АТЗ з масою пасажирів 50%.

Норма ВП на транспортну роботу *Hw* застосовується для вантажних бортових АТЗ, сідельних тягачів в складі автопоїзда, АТЗ-фургонів, вантажопасажирських легкових АТЗ та автобусів з причіпами, за умов обліку їх роботи в т·км. Гранично допустимі норми *Hw* приймають: для бензину – 2,0 л/100 т·км; ДП – 1,3 л/100 т·км.

На дорогах з твердим покриттям за межами міста за умов, що не підпадають під вказані коефіцієнти коригування згідно з [85], гранично допустимі норми ВП *Hw* приймають: для бензину – 1,4 л/100 т·км; ДП – 0,9 л/100 т·км.

Норми на тонну зміненої спорядженої маси *Hg* (л/100 т·км) АТЗ, залежно від виду палива, що використовується, дорівнюють нормам для виконання транспортної роботи.

Норма на маневрування та виконання операцій завантаження/розвантаження *Hz* застосовується для самоскидів. Вона враховує ВП, які пов’язані з вказаними операціями, встановлюється на їздку з вантажем та розраховується:

$$H_Z = 0{,}02G_B, \quad (1.1)$$

де H_z – норма їздки з вантажем, л;

G_B – вантажність АТЗ, т.

У випадку використання бензину норма збільшується ще на 25%. Норма ВП на роботу спецобладнання, яке встановлено на АТЗ, *Ноб* застосовується для спеціалізованих та спеціальних АТЗ, протягом виконання роботи в процесі стоянки.

Норму на пробіг АТЗ для виконання спеціальних робіт *Hsc* використовують для спеціальних автомобілів, які виконують поливомийні, прибиральні, снігоочисні роботи тощо.

Норму ВП за використання автономного обігрівача *Нон* для АТЗ визначають як відсоток базової норми ВП на годину його роботи залежно від температури повітря НС: нижче +15 °С та до +5 °С – до 20%; нижче +5 °С та до -5 °С – до 40%; нижче -5 °С та до -15 °С – до 60%; нижче -15 °С та до -25 °С – до 80%; нижче -25 °С – до 100% [85].

Отже, нормативна ВП *Qн* – це витрата палива за пробіг, (виконання транспортної роботи) в конкретних умовах експлуатації АТЗ.

Значення нормативних ВП встановлюють залежно від фактичних потреб суб’єктів. Водночас перевищення гранично допустимих значень витрат не допускається. Витрати мають відповідати конкретним умовам експлуатації АТЗ, враховувати рекомендації виробника АТЗ щодо його експлуатації, задовільного стану автомобіля (обладнання), дотримання вимог раціонального використання АТЗ, забезпечення безпечних та економічних режимів експлуатації відповідно до вимог Правил дорожнього руху.

Рекомендації [85] наголошують, що встановлення суб’єктами норм ВП потрібно проводити з урахуванням практик, технологій та

заходів щодо зменшення його споживання. Потрібне планування маршрутів перевезень, об'єднання їздок тощо. Особливо зазначається потреба у плануванні декількох поїздок в послідовності, що зменшить загальний пробіг і час простою, регулярного контролю тиску в шинах коліс автомобіля, навчання водіїв безпечним й економічним прийомам керування, застосування матеріального заохочення водіїв.

Важливим також є те, що суб'єкт проводить аналіз причин відхилення фактичних витрат від встановлених норм, може змінювати ці норми залежно від до зміни умов експлуатації. Суб'єкт має вживати заходів щодо зменшення впливу різних причин, що призводять до збільшення фактичної ВП вище за встановлену норму ВП. Такий аналіз дозволяє своєчасно виявляти та усувати технічні несправності АТЗ та його обладнання, вживати заходів з впровадження економічних і безпечних режимів керування.

Моделі та модифікації АТЗ без суттєвих конструктивних відмінностей двигуна, трансмісії та однакові за спорядженою масою, габаритами тощо, тимчасова ЛН застосовуються в розмірі, як для базової моделі.

Якщо АТЗ відрізняються від базового спорядженою масою, тимчасова ЛН встановлюється як і для базового АТЗ, а різниця у ВП враховується в нормі на тонну спорядженої маси, яку змінено, *Hg* (л/100 т·км).

Для нових моделей (модифікацій) АТЗ, встановленого обладнання, технологічних машин, засобів, що виконують спеціальну роботу або виконують перевезення в специфічних умовах, на час виконання технологічних операцій визначаються індивідуальні тимчасові, базові ЛН, базові та диференційовані норми ВП. Водночас коефіцієнти, що уточнюють ці норми, за заявками заводів-виробників та суб'єктів розробляються окремо ДП «ДержавтотрансНДІпроект» на основі інформації щодо умов експлуатації, технічного стану АТЗ та

їх конструкції. Такі норми встановлюють на період апробації до двох років.

Для роботи спеціального обладнання, що встановлено на АТЗ, допускається застосовувати норми, що їх встановлює завод-виробник цього обладнання. Дозволяється окремо розрахувати норми з використанням технічної документації на таке обладнання. За відсутності необхідних для розрахунку даних, суб'єкт проводить контрольні заміри ВП на технічно справних АТЗ в кількості не менше трьох. Температура НС має бути не нижчою 10 °С, крім АТЗ, що призначено для використання лише в зимовий час. Результати трьох замірів усереднюють та оформлюють відповідним актом для подальшого застосовування як тичасової норми ВП.

Норми підвищуються залежно від фактичної температури повітря НС: 0 … -5 °С – до 2%; -5 … -10 °С – до 4%; -10 …-15 °С – до 6%; -15 …-20 °С – до 8%; -20 …-25 °С – до 10%; нижче -25 °С – до 12% [85].

Вказане збільшення використовують залежно від фактичної середньої температури повітря за даними Укргідрометеоцентру Держгідрометеослужби, інших джерел або за результатами власних вимірювань. В розрахунках обирається значення середньодобової температури, що припадає на вказаний час експлуатації АТЗ. Можуть окремо виділятися періоди експлуатації з встановленням індивідуальних надбавок. Для окремих АТЗ може встановлюватись значення надбавки на певний період. Порядок урахування умов для розрахунків нормативних ВП визначається суб'єктом, що експлуатує АТЗ.

Якщо здійсненнюються перевезення в інші кліматичні зони, коригування виконують з урахуванням температури навколишнього середовища кінцевого та початкового пунктів маршруту. За межами

України температура повітря визначається власними вимірюваннями або за даними Укргідрометеоцентру Держгідрометеослужби, а також метеослужб інших країн.

У випадку власних вимірювань дозволяється використання штатного покажчика температури повітря автомобіля та/або стаціонарних термометрів в межах заданого географічного району, населенного пункту тощо. Суттєві розбіжності (більші 5 °С) в показах приладів вимірювання температур не допускаються.

Методика рекомендує застосовувати надбавку для врахування зимових умов роботи залежно від кількості їздок, але за умови, що у загальному пробігу АТЗ відстань складає менше 5 км. Якщо, наприклад, у загальному пробігу середня довжина їздки більша 10 км, застосовують мінімальні надбавки на роботу в зимових умовах, які пов’язані з температурним режимом роботи агрегатів АТЗ [85].

Такі надбавки застосовують, за потреби, на перші два кілометри пробігу або на меншу відстань (після перерви з непрацюючим ДВЗ за часом не менше однієї години) та залежно від середньої температури повітря (включно): 0…-5 °С – до 2%; -5…-10 °С – до 4%; -10…-15 °С – до 6%; -15…-20 °С – до 8%; -20…-25 °С – до 10%; нижче -25 °С – до 12% [85].

Важливо, якщо умови експлуатації АТЗ передбачають до початку руху стоянку з непрацюючим ДВЗ більше однієї години, вони мають бути документовані (наприклад, даними GPS-моніторингу, тахографів тощо).

Коефіцієнти коригування норм ВП враховують також роботу в гірській місцевості (маршрути з горбистим рельєфом). В такому випадку застосовують надбавку, яка залежить від висоти над рівнем моря: 300…800 м – до 5%; 801…2000 м – до 10%; 2001…3000 м – до 15%; вище 3001 м – до 20% [85].

Якщо на маршруті руху АТЗ наявний рельєф, що позначено відповідними дорожніми знаками, застосовують надбавки: 4…8% – до 5%; 8% та більше – до 10%.

За необхідності вказана надбавка може застосовуватись не на весь маршрут, а лише на його частину.

Надбавку до 10% застосовують при роботі на дорогах складного плану, на яких мають місце більш п’яти заокруглень радіусом менше сорока метрів на одному кілометрі шляху.

В міських умовах руху також застосовуються відповідні коефіцієнти коригування: в населених пунктах за наявності регульованих перехресть та промислових зон – до 5%; в межах окремих міст (перелік з 40 найбільших міст України) – до 10%; в межах таких великих міст, як Донецьк, Дніпро, Київ, Запоріжжя, Одеса, Львів, Харків – до 15% [85].

Важливо зазначити, що для гібридних АТЗ гранично допустиме значення надбавки не використовується або зменшується на % [85].

Якщо робота АТЗ пов’язана зупинками (більше однієї на кілометр пробігу), з напруженими дорожніми умовами та поїздками на відстань до п’яти кіклометрів з перервами на годину та більше, ВП коригується на величину до 10%. Якщо виконуються перевезення на короткі відстані з тривалими перервами та вимкненим ДВЗ, застосовують диференційовані надбавки, які залежать від середньої довжини їздки: до 5, але більше 3 км – до 10%; до 3 та більше 2 км – до 15%; до 2 та більше1 км – до 20%; до 1 та більше 0,5 км – до 30%; до 0,5 км – до 40% [85].

Коефіцієнт застосовується також і на ділянці маршруту з вказаними умовами руху, за умов підтвердження цього записами у дорожніх листах, даними тахографів, засобів GPS-моніторингу.

За потреби на пробіг перших двох км після стоянки з непрацюючим ДВЗ тривалістю година та більше застосовують

надбавку до 20%. Під час встановлення значень надбавок за роботи з частими зупинками (або надбавки на пробіг перших 2 км) рекомендовано використання більших значень надбавки для АТЗ з постійним приводом на понад одну вісь, що пов’язано з меншим значенням ККД трансмісії [85].

За умов руху на швидкостях до 20 км/год (сільськогосподарські роботи, в колонах, в заторах, в умовах проведення дорожніх робіт тощо) застосовують надбавку до 10%, яка приймається, за необхідності, і на частину маршруту, що має бути задокументовано належним чином (записи у дорожньому листі, покази тахографа та дані GPS-моніторингу).

За роботи поза дорогами загального користування (лісові, польові, степові дороги, та умов пересіченої місцевість, в кар’єрах, у зоні бойових дій тощо) застосовують надбавку до 20%. Якщо АТЗ до цього має рухатись в умовах бездоріжжя, заметів, снігопаду, ожеледиці тощо зі швидкостями до 20 км/год, а також в зоні бойових дій, використовують надбавку до 50%.

Якщо рух АТЗ відбувається дорогами загального користування в умовах сезонного бездоріжжя (снігопад, ожеледиця, паводок тощо), застосовують надбавку до 35%. Для надважких дорожніх умов в зоні бойових дій (дороги загального користування з перешкодами) або рух під обстрілом застосовують надбавку до 50% як на весь маршрут, так і на частину маршруту.

Зважаючи на термін експлуатації АТЗ застосовують коригування залежно від: більше 5 років та пробіг понад 100 тис. км – до 3%; більше 8 років або пробіг понад 150 тис. км – до 5%; більше 11 років або з пробігом понад 250 тис. км – до 7%; більше 14 років або з пробігом понад 400 тис. км – до 9%. Вказані надбавки застосовують за фактичним збільшенням ВП у мінімальному розмірі, для АТЗ

сучасних конструкцій та після їх капітального ремонту (заміни) двигуна [85].

Погодинна робота вантажних та вантажопасажирських АТЗ (крім самоскидів), а також їх регулярне використання як технологічний транспорт дозволяє застосовувати надбавку до 10%.

Для навчання водінню на дорогах загального користування в містах використовується надбавка до 20%, за межами міста – до 5%, на навчальних майданчиках за певних умов руху – до 40% [85].

У разі створення комфортних умов в салоні АТЗ (забезпечення необхідної оглядовості) використовують надбавки, які вибирають відповідно до температури середовища: +5…-5 °С – до 0,5%; -5…-15 °С – до 1%; -15…-25 °С – до 1,5%; від -25 °С – до 2% [85].

За використання автономних засобів обігріву та за відсутності норм ВП на їх роботу, застосовують надбавки за температурних умов: +15…+5 °С – до 2%; +5…-5 °С – до 4%; -5…-15 °С – до 6%; -15…-25 °С – до 8%; від -25 °С – до 10%. У разі використання установки «клімат-контроль» (кондиціонера) використовують надбавку: +20… +25 °С – до 5%; +25…+30 °С – до 7%; вище +30 °С – до 10% [85].

Якщо використовується штатний засіб осушення повітря в салоні за фактичною температурою повітря +20…0 °С (також за низьких температур, якщо це передбачено заводом-виробником) використовують надбавку до 4%. Її доцільність визначають відповідно до умов експлуатації та рекомендацій виробника АТЗ. Надбавка не застосовується за температурих умов НС, коли використання вказаних засобів осушення не передбачено заводом-виробником. За умов зниження температури НС до +15…+20 °С та нижче для економії палива рекомендується вимикати кондиціонер або установку «клімат-контроль», не застосовуючи в такому випадку

надбавку постійно, з дотриманням правил експлуатації устаткування та рекомендацій заводу-виробника.

У разі експлуатації АТЗ на дорогах загального користування поза населенними пунктами та на дорогах, де дозволений швидкісний режим до 90 км/год та вище, застосовують надбавку до 5%, яка поширюється на автомобілі-фургони, АТЗ з тентами, вантажні автомобілі для перевезення великогабаритних вантажів, спеціальні АТЗ та спеціалізовані оперативні за фактичної швидкості руху вище 70 км/год.

Робота з інтенсивним рухом оперативних АТЗ, що їх застосовують для виконання службових завдань з використанням режимів прискорення/гальмування застосовують надбавку до 10%. Для АТЗ, що рухаються з підвищеною швидкістю (наприклад, в зоні бойових дій) та з інтенсивним маневруванням на підвищеній швидкості, застосовують надбавку до 25%.

Норми ВП також можуть бути зменшені у випадках, коли автомобіль рухається поза населеними пунктами на дорогах загального користування, або які проходять в населенних пунктах з дозволеною швидкістю до 90 км/год залежно від фактичної швидкості: для легкових АТЗ – 15…30%; для інших – 5…20% [85].

Рух по автомогистралях з максимально дозволеною швидкістю вище 90 км/год та з фактичною швидкістю до 90 км/год, залежно від швидкості, вимагає зменшення норм ВП: для легкових автомобілів – 15…30%; для інших АТЗ – 5…20% [85].

У разі руху з дозволеними швидкостями 90…110 км/год потрібно зменшувати норму ВП на 10…20%, а у разі руху з дозволеними швидкостями більше 110 км/год – від 5…10% [85].

Експлуатація міських АТЗ «на замовлення» не на постійних маршрутах вимагає зменшення ВП на 5…10% [85].

Всі знижувальні коефіцієнти застосовують для перевезень у приміській зоні, в умовах незадовільного стану дорожнього покриття, проведення дорожніх робіт тощо, коли рух зі швидкостями більше 40 км/год є фактично неможливим. Ці коефіцієнти також застосовують і на частину маршруту в межах вказаних міст.

Для гібридних АТЗ застосовують менші значення знижувальних коефіцієнтів, але, залежно від фактичних потреб, під час руху зі швидкістю до 90 км/год до 5% для легкових АТЗ, для інших – менші значення коефіцієнтів коригування.

Згідно з наведеними рекомендаціями потрібно визначати сумарний коригувальний коефіцієнт, як правило, в експлуатації різноманіття умов експлуатації АТЗ вимагає їх одночасне застосування. За таких умов сумарний коефіцієнт коригування розраховують як суму всіх надбавок (коефіцієнти зменшення приймаються від'ємними).

Одночасно з нормативними ВП використовують ДН в обсягах [85]:

- на внутрішньогаражній рух та технічні потреби – до 0,5% від загальної кількості спожитого палива;
- за простої під час завантаження/розвантаження в пунктах, де необхідно вимикати двигун – до 5% від базової норми на одну годину простою з коригуванням залежно від кліматичних умов.

В разі вимушених простоїв у холодну пору року з увімкненим ДВЗ за потреби обігрівання салону в теплу пору року, коли використовується установка «клімат-контроль» (кондиціонер) – дозволяється збільшувати норму ВП до 5% на годину простою.

У разі простоїв з двигуном, що працює, – до 5% від лінійної базової норми на одну годину простою з коригуванням відповідно до кліматичних умов.

Норма додаткового споживання палива застосовується у разі запуску ДВЗ на рідкому паливі, або в разі подальшого використання газового палива відповідно до записів у дорожньому листі або іншому звітному документі. Значення цієї норми виьирають залежно від кількості пусків ДВЗ за звітний період.

На переміщення в межах підприємств з використанням рідкого палива для АТЗ, які працюють на газових паливах, встановлюють норму витрати рідкого палива до 5% на місяць від базової ЛН.

Встановлення норм ВП з урахуванням всіх експлуатаційних факторів (дорожні, кліматичні тощо) також проводять шляхом застосування коригувальних коефіцієнтів, наведених в [85].

Щоб забезпечити економне використання палив на АТ та запобігти зловживанням, рекомендується в процесі розрахунків диференційоване застосування коефіцієнтів коригування норм, спираючись на фактичні потреби для вказаних конкретних умов експлуатації АТЗ. Також бажано встановлювати значення коефіцієнтів коригування окремо для кожного АТЗ залежно від його особливостей: конструкція, технічний стан, умови експлуатації тощо.

Висновки до розділу 1

1. Розглянуто основні ФХВ компонент БП та їх вплив на роботу ДВЗ. Підкреслено, що стосовно заміни традиційних видів рідких палив на транспорті сьогодні перспективною є заміна традиційних нафтових моторних палив на палива біологічного походження, які мають низку переваг порівняно з традиційними мінеральними: можливість виробництва з відновлюваної сировини і сільськогосподарських продуктів, карбонова нейтральність, екологічність, повна біологічна розчинність за атмосферних умов тощо.

2. Показано основні світові тенденції зростання виробництва БП, зокрема, у таких ключових країнах, як США, ЄС, Індонезія та Аргентина. Відмічено, що, не зважаючи на ситуацію, коли цивілізоване людство, почавши відновлюватись після пандемії коронавірусу, зіткнулося з новим викликом – військовим вторгненням росії в Україну, ринок БП продовжує активно розвиватися.

3. Аналіз нормативної бази для визначення норм ВП показує: щоб врахувати різноманіття умов експлуатації АТЗ, крім базових норм ВП, потрібно використовувати велику кількість коригувальних коефіцієнтів. Водночас, щоб встановити норми та КВБ ЗАТ на основі чинної законодавчої бази, потрібно проводити експериментальні дослідження витрат в реальних умовах експлуатації, що є досить трудомістким та тривалим процесом, до того ж на результати якого впливають фактори, які важко врахувати (погода, стан дорожнього покриття, характер, стиль та досвід водія тощо).

4. Проведений системний аналіз відчизняного і зарубіжного науково-практичного досвіду застосування БП дозволив сформулювати нижчевказані задачі дослідження:

- провести оцінювання впливу різних концентрацій різних біодомішок на зміну витрат рідких БП;
- обгрунтувати принципи та розробити концепцію умов ефективного використання 1 кг рідкого БП з урахуванням відносної густини біодомішки, відносної НТЗ біодомішки та відносної ТНКП для згорання 1 кг біодомішки;
- виконати комплексне оцінювання і системний аналіз існуючих підходів до розв’язання проблеми підвищення точності і швидкодії вимірювання та контролю витрат БП, розширити діапазон вимірювання витрат, номенклатуру БП та функціональні можливості ТАВ як засобів вимірювання і КВБ;

- обгрунтувати підхід і розробити метод вимірювання та КВБ врахуванням їх ФХВ, сформулювати вимоги ефективного використання обраного методу та засобів контролю;
- обгрунтувати критерії ефективності роботи ТАВ та визначення раціональних конструктивних параметрів його елементів, які розширюють діапазон вимірювання та КВБ, підвищують швидкодію та точність вимірювання;
- провести моделювання динамічних процесів ТАВ у разі різних витрат БП з різною концентрацією біологічної складової, обґрунтувати рекомендації використання розподілу температур в радіальному та осьовому напрямках потоку палива для управління паливною економічністю автомобіля;
- провести ідентифікацію динамічних параметрів ТАВ та основних характеристик їх елементів, оцінити адекватність та ефективність розроблених математичних моделей ТАВ автомобіля експериментальними дослідженнями та виробничим випробуванням.

РОЗДІЛ 2 МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ БІОПАЛИВ З УРАХУВАННЯМ ВМІСТУ БІОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ В НИХ

ВП АТЗ є важливим показником ефективності їх експлуатації. Для здійснення контролю за ВП АТЗ потрібно застосовувати науково обгрунтовані та законодавчо затверджені методи її визначення, контролю, обліку та нормування. Такий контроль потрібний для моніторингу показників перевезень, зокрема і для списання витраченого палива, що його регламентує документ [85], який розроблений ДП «ДержавтотрансНДІпроект». Ці методичні рекомендації під нормуванням ВП передбачають встановлення обсягів споживання палива в конкретних відомих умов експлуатації АТЗ і визначають використання базових ЛН, нормативів і засобів коригування, з ураховуванням транспортної роботи та умов експлуатації АТЗ. Нині цей документ потребує перегляду та доопрацювання, оскільки не регламентує КВБ та норми їх витрат.

2.1 Обгрунтування доцільності контролю витрат біопалив для підвищення ефективності експлуатації засобів автомобільного транспорту

Доцільність КВБ АТЗ має бути підкріплена, перш за все, критеріями ефективності досягнення мети (рис. 2.1). Вони можуть бути економічними, соціальними, соціально-економічними, екологічними, політичними тощо. Досвід багатьох країн показує, що правильний вибір і акцент на кожному етапі впровадження процесу використання БП для конкретно вибраного критерію ефективності, залежить від правильної внутрішньої політики держави. Мова йде про акцизну політику, стимулювання виробників БП, створення

привабливісті інвестицій в процес виробництва, переробку продукції, отримання зберігання транспортування та використання БП.

Важливою складовою критеріїв ефективності є наявність вигоди для індивідуального споживача або групи споживачів, наявність політичної, економічної, соціальної, екологічної вигоди для конкретного регіону та держави в цілому. Мають бути розроблені інструменти реалізації механізму КВБ АТЗ. Для успішної реалізації та використання КВБ на АТ обов'язковим є поглиблення знань про параметри ефективності їх використання, вирішення науково-прикладних проблем контролю витрат з аналізом синергетичного ефекту в період переходу на використання БП. На попередньому етапі та в процесі використання БП обов'язковим та важливим є маркетинговий контроль і вивчення всіх аспектів використання та КВБ.

КВБ для підвищення ефективності експлуатації АТЗ неможливий без створення та вдосконалення організаційно-правової та нормативних баз. Для цього в Україні вже створено передумови, які відображено в:

- Концепції державної цільової економічної програми розвитку автомобільних перевезень;
- Стратегії розвитку автомобільних перевезень;
- Концепції розвитку транспортно-дорожнього комплексу України;
- Транспортній стратегії України на період до 2030 року;
- законах України «Про автомобільні дороги», «Про автомобільний транспорт», «Про дорожній рух»;
- законі України «Про джерела фінансування дорожнього господарства»;
- Стратегії розвитку освіти до 2025 року.

Потрібно вказати, що Верховна Рада України прийняла Закон № 3769-IX «Про внесення змін до деяких законів України щодо

обов'язковості використання рідкого біопалива (біокомпонентів) у галузі транспорту» від 4.06.2024 року, який встановлює обов'язкове використання рідкого БП (біокомпонентів) у галузі транспорту, згідно з яким виробники мають додавати в автомобільне паливо 5% рідкого БП. Норма почне діяти з 1 травня 2025 року і стосуватиметься бензину та ДП, що реалізується в Україні [184].

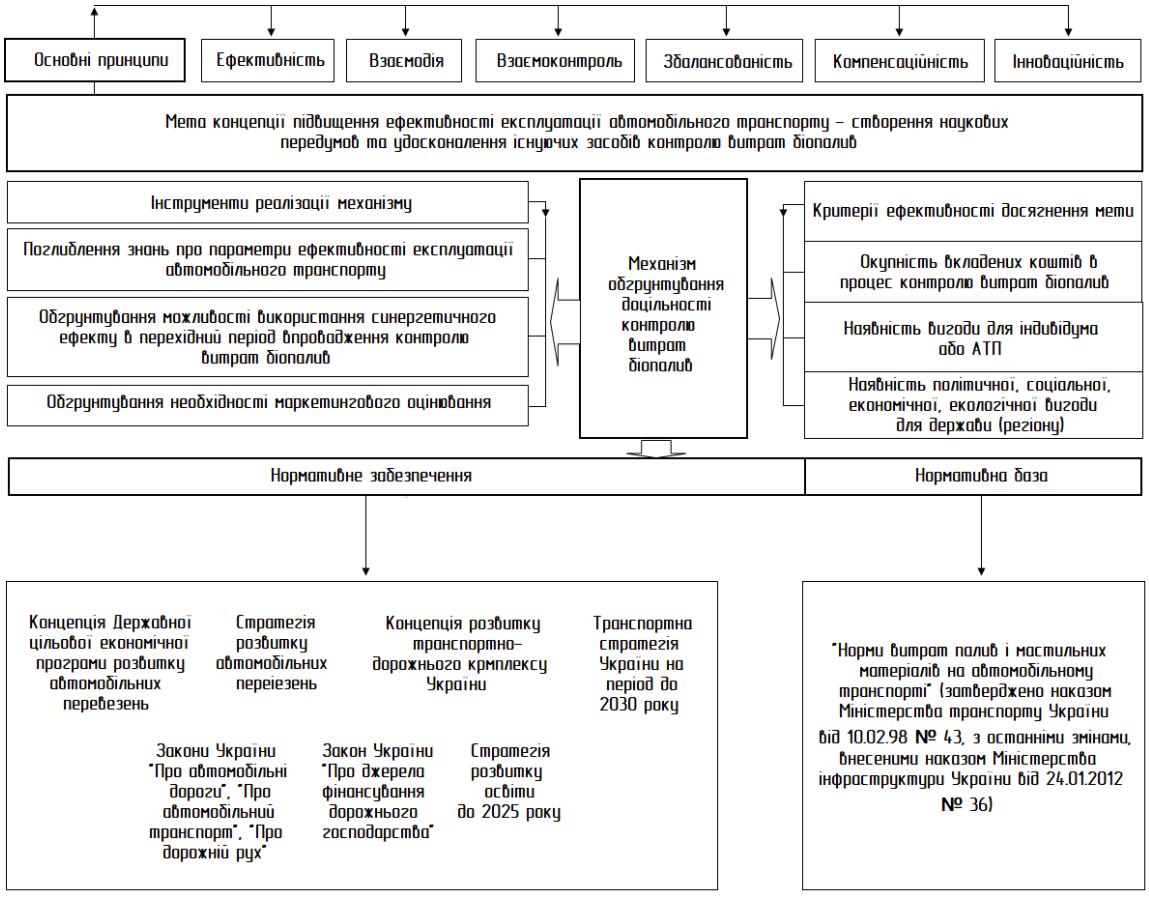


Рисунок 2.1 – Обґрунтування доцільності розробки та впровадження КВБ

Джерело: розроблено на основі [185]

Для досягнення мети концепції підвищення ефективності експлуатації АТЗ – створення наукових основ та удосконалення існуючих засобів КВБ в процесі їх розробки, впровадження та використання – в саму концепцію потрібно закладати такі принципи:

ефективність, взаємодія, взаємний контроль, збалансованість, інноваційність, компенсаційність.

Принцип ефективності залежить від правильного вибору відповідних критеріїв, їх визначення, аналізу та прийняття рішення про управлінську дію за потреби.

Принципи взаємодії та взаємного контролю мають бути реалізовані через обмін інформацією про отриману ефективність і порівняння її з іншими критеріями підвищення ефективності експлуатації АТЗ. Вони передбачають взаємну зацікавленість, відкритість і доступність контролю, взаємну співпрацю всіх сторін процесу підвищення ефективності експлуатації АТЗ у разі реалізації мети запропонованої концепції.

Принцип збалансованості дозволяє організувати державний контроль за призначенням, розподілом і використанням фінансових вкладень, надати державні гарантії інвесторам, забезпечити участь держави у фінансуванні розроблених положень концепції.

Принцип компенсації вкладень полягає у поверненні інвестицій, що їх вкладено в проєкт, за рахунок отриманого прибутку або економічної вигоди від підвищення ефективності експлуатації АТЗ.

Інноваційність зумовлена технічним удосконаленням та переоснащенням як АТЗ, так і підприємств, запровадженням прогресу в галузі через використання сучасних засобів вимірювання, контролю, аудиту нормування та використання БП засобами сучасної комп’ютерної та МП техніки і технологій.

2.2 Існуючі моделі визначення та контролю витрат палив на автомобільному транспорті

Існуючі моделі визначення та контролю ВП використовують для прогнозування його споживання, створення та оцінювання нових

технологій енергоспоживання на транспорті, обліку та нормування ВП, економічного та екологічного водіння АТЗ.

Треба зазначити, що через високу багатофакторність та нелінійність процесів споживання палив АТЗ в системі «водій-автомобіль-дорога-НС» (ВАДС) є можливим розробити лише наближену модель розрахунку ВП в реальному часі. Водночас потрібно враховувати найбільш впливові (для цього конкретного аналізу) фактори, кількість яких доводиться обмежувати.

Автори [159] пропонують виділяти основні, найбільш впливові фактори для кожного конкретного випадку залежно від мети аналізу. Важливими з них вони вважають фактори, що пов’язані з завантаженням на маршруті руху, погодою, конструкцією АТЗ, станом дорожнього покриття, маршрутом і режимами руху, діями водія (рис. 2.2).

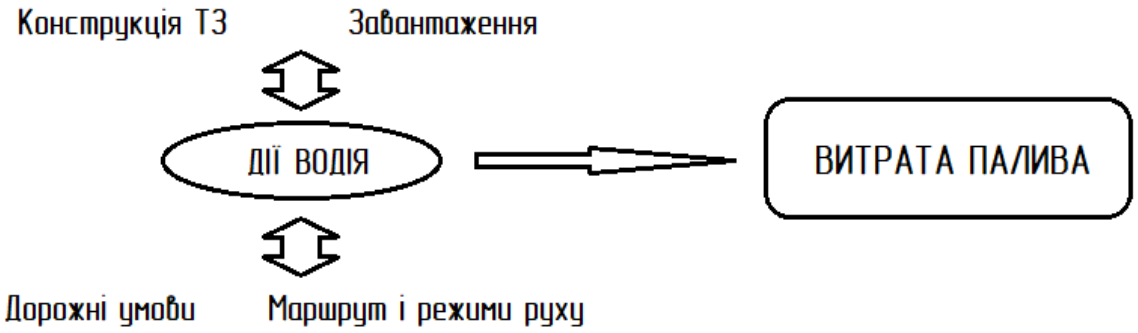


Рисунок 2.2 – Основні фактори, що впливають на ВП АТЗ

Джерело: розроблено на основі [159]

В роботах [66, 159] запропоновано розглядати нижченаведені існуючі моделі ВП (рис. 2.3):

- модель «Білий ящик» пропонує підхід до аналізу зміни ФХВ палив, їх складу на різних етапах робочого процесу ДВЗ;

- модель «Сірий ящик», яка оперує середніми значеннями показників процесу витрат, наприклад, на маршруті руху ТЗ, за певний час тощо;
- модель «Чорний ящик» базується лише на експериментальних дослідженнях і потребує обробки та аналізу великих масивів даних;
- «Гібридна модель» може бути запропонована для контролю ВП в процесі експлуатації АТЗ, оскільки враховує особливості, недоліки та переваги трьох попередніх моделей, а також конструктивні параметри ТЗ і його ДВЗ, режими та конкретні умови руху, дії водія тощо.

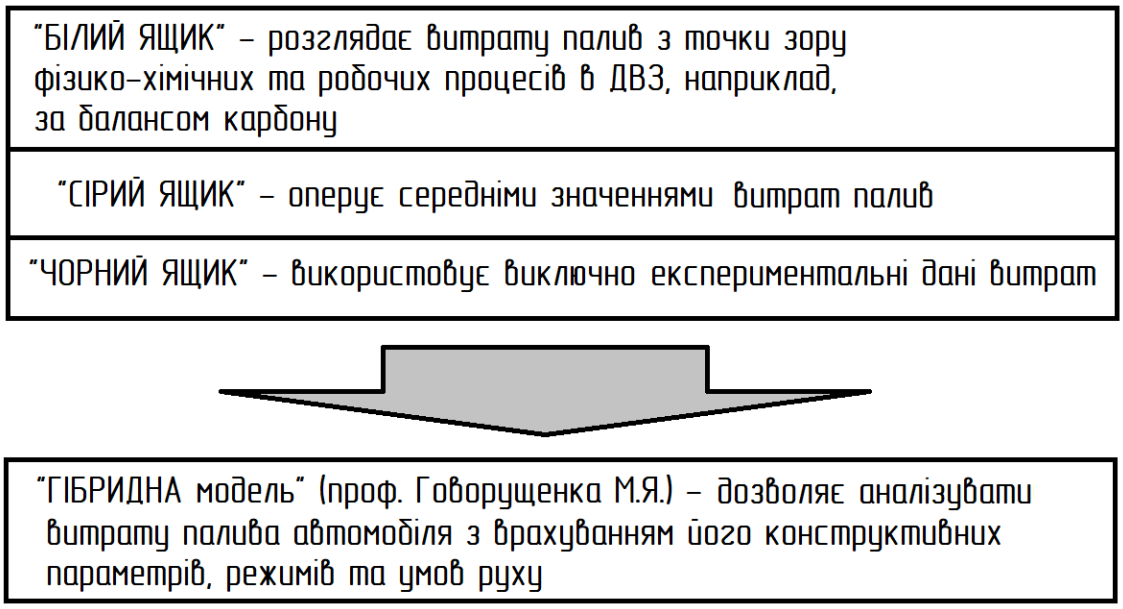


Рисунок 2.3 – Моделі ВП

Джерело: розроблено на основі [66]

Можна вважати, що «Гібридна модель» більш повно описує вплив параметрів всієї системи ВАДС на ВП АТЗ.

2.3 Методологічні основи визначення і контролю витрат біопалив в процесі руху автомобіля

Останнім часом переведення ДВЗ АТЗ на АДЕ стає найактуальнішим. Для двигунів з іскровим запалюванням

альтернативою є сумішеві бензини з домішками БЕ різних концентрацій. Для дизелів як АП пропонується БД, тобто суміш ОРП з метиловим спиртом в співвідношеннях 7:1, …, 10:1. БД (БП дизельне, EMAG, FAME, PME, MEPO, SME, SFME тощо) – це паливо з БС, яке отримують з ОРП або тваринного жиру.

БД використовують в суміші з ДП або самостійно та позначають, наприклад, В50 – 50% БД в ДП. БД теоретично можна отримувати з будь-яких ОРП, але найчастіше – з ріпакової, пальмової, соняшнікової, соєвої, кукурудзяної олій. У разі вибору конкретної олії беруть до уваги її собівартість отримання, доступність. Важливо, що отримання БД можливе з тваринних жирів та харчових жирових відходів [66].

Відома відносно велика кількість математичних моделей, методів розрахунку та засобів визначення ВП АТЗ. Також відомо, шо вони мають різні недоліки та не дозволяють повною мірою проводити контроль ВП. Наприклад, на кафедрі «Технічної експлуатації і сервісу автомобілів» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету розроблено математичну модель, яка дозволяє визначати годинну ВП двигуна АТЗ на режимі холостого ходу або за постійного навантаження. Ця модель є спрощеною, оскільки в неї використано поліноміальну апроксимацію певних залежностей для конкретного ДВЗ, що встановлюють на автомобіль з бензиновим ДВЗ Skoda Octavia 1,6 MPi та дизельним ДВЗ Skoda Octavia 2,0 TDi. Оскільки ці залежності отримано експериментально, вони мають певний ступінь наближення до реальних експлуатаційних ВП як зазначених, так інших АТЗ.

В [10, 37, 41] запропоновано підхід до визначення витрат БП через аналіз процесів сумішоутворення в циліндах ДВЗ. Однак він передбачає на вході мати параметри режимів роботи ДВЗ, конструктивні характеристики форсунок, тиск впорскування тощо,

але такий підхід обмежує можливість аналізу впливу окремих чинників та здійснювати КВБ ДВЗ АТЗ в цілому. Серед них в експлуатації під час руху АТЗ мають значення його швидкість, ККД трансмісії, сумарний опір дороги, передавальні числа коробки передач та головної передачі, параметри обтічності АТЗ, його завантаження тощо.

Зазначимо, що всі запропоновані методи не передбачають визначення ВП з різними властивостями біодомішок різних ОК, до яких належать: густина, в'язкість, поверхневий натяг тощо. Отже, на сьогодні відсутня методика розрахунку норм витрат БП, а це унеможливлює контроль їх витрат в експлуатації, що є важливим та потребує уваги науковців.

Тому виникає потреба у створенні методу розрахунків показників паливної економічності автомобілів контролем витрат різних за властивостями рідких БП, що використовують ДВЗ в процесі руху АТЗ, розроблені та аналізовані схеми методу для створення передумов удосконалення системи КВБ.

«Гібридна модель» Говорущенка М. Я. описує ВП АТЗ з відомими конструктивними характеристиками та рухається на відомих режимах:

$$Q = \frac{1}{\eta_i}\left[Ai_k + Bi_k^2 V_a + C\left(G_a \Psi + kFV_a^2 \pm 0{,}1 G_a \dot{V}_a\right)\right], \qquad (2.1)$$

де η_i – індикаторний ККД ДВЗ;

A, B, C – розрахункові коефіцієнти;

i_k – ПЧКП автомобіля;

V_a – швидкість руху, км/год;

G_a – вага автомобіля, Н;

Ψ – коефіцієнт сумарного опору дороги;

kF – фактор обтічності автомобіля, Н·с^2/м^2;

$\dot{V}_a$ – прискорення автомобіля, м/с^2;

β – коефіцієнт врахування обертальних мас АТЗ; $\beta = 1+(0,03...0,07)i_к^2$.

Для бензинового ДВЗ:

$$A = \frac{358V_h i_0}{H_H \rho_П r_K}; \qquad B = \frac{9V_h S_П i_0^2}{H_H \rho_П r_K^2}; \qquad C = \frac{100}{H_H \rho_П \eta_{TP}}, \qquad (2.2)$$

де V_h – робочий об'єм циліндрів ДВЗ, л;

i_0 – передавальне число головної передачі автомобіля;

H_H – НТЗ палива, МДж/кг;

$\rho_п$ – густина палива, кг/м^3;

$r_к$ – радіус кочення колеса, м;

$S_п$ – хід поршня, м;

η_{TP} – ККД трансмісії.

Для дизеля коефіцієнт C визначають за (2.2), коефіцієнти A і B визначають за формулою (2.3):

$$A = \frac{385V_h i_0}{H_H \rho_П r_K}; \qquad B = \frac{11V_h S_П i_0^2}{H_H \rho_П r_K^2} \qquad (2.3)$$

Індикаторний ККД двигуна визначають:

$$\eta_i = \frac{P_i L_0 RT}{H_H \eta_V P}\alpha, \qquad (2.4)$$

де P_i – СІТ в циліндрі ДВЗ, МПа;

L_0 – ТНКП для згорання 1 кг палива, кг палива/кг повітря;

R – універсальна газова стала, R = 8,31 Дж/моль·К;

T – температура, К;

η_V – коефіцієнт наповнення циліндрів двигуна;

P – тиск, МПа;

α – коефіцієнт надлишку повітря.

В (2.4) існує взаємний вплив між деякими параметрими (рис. 2.4).

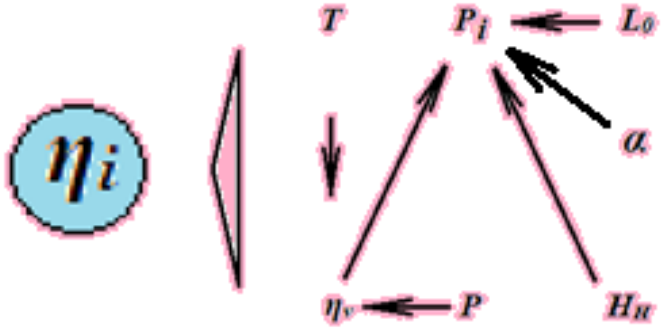


Рисунок 2.4 – Вплив деяких показників на індикаторний ККД ДВЗ

Джерело: розроблено на основі [131].

Аналізуючи рис. 2.4, з достатньою ймовірністю можна прийняти взаємозв'язок між атмосферними температурою T та тиском P, між коефіцієнтом наповнення циліндрів ДВЗ η_v та СІТ P_i , між тиском P, НТЗП $H_н$ та СІТ P_i. Також зрозуміло, що на величину СІТ P_i в циліндрах ДВЗ впливають практично всі параметри у виразі (2.4) через інші складові або безпосередньо, тобто існує непрямий зв'язок між параметрами.

ТНКП для згорання 1 кг палива L_0 за фізичним змістом впливає на знаменник коефіцієнта надлишку повітря α та знаходиться в чисельнику виразу (2.4). Наявність біодомішок в БП з іншими значеннями ТНКП для згорання 1 кг, порівняно з аналогічним показником «основного» палива, буде змінювати склад ППС ДВЗ.

Якщо прийняти, що наявність домішок в БП не змінює швидкісний режим ДВЗ, можлива зміна складу ППС може бути скомпенсована зміною навантажувального режиму ДВЗ, згідно з (2.4) на ВП впливатиме тільки зміна ТНКП для згорання 1 кг палива.

Для подальшого аналізу зміни ВП, що містить в собі дві компоненти, пропонується ввести такі категорії:

- відносна ТНКП для згорання 1 кг домішки;
- відносна густина домішки;
- відносна НТЗ домішки.

Відносна ТНКП для згорання 1 кг біодомішки:

$$\Delta L_0 = \frac{L_{0осн} - L_{0Д}}{L_{0осн}}, \quad (2.5)$$

де $L_{0осн}$ – ТНКП для згорання 1 кг основного рідкого палива, кг повітря/кг палива;

$L_{0Д}$ – ТНКП для згорання 1 кг біодомішки, кг повітря/кг біодомішки;

Значення відносної густини за введеним визначенням можна отримати:

$$\Delta\rho_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{п.осн}} - \rho_{\text{п.д}}}{\rho_{\text{п.осн}}}, \quad (2.6)$$

де $\rho_{\text{п.осн}}$ – густина основного палива, кг/л;

$\rho_{\text{п.д}}$ – густина біодомішки, кг/л.

Відносну НТЗ визначають аналогічно за змістом:

$$\Delta \text{Н}_{\text{Н}} = \frac{\text{Н}_{\text{н.осн}} - \text{Н}_{\text{н.д}}}{\text{Н}_{\text{н.осн}}}, \quad (2.7)$$

де $Н_{н.осн}$ – НТЗ основного палива, МДж/кг;

$Н_{н.д}$ – НТЗ біодомішки, МДж/кг.

Таким чином, якщо основне паливо має меншу ТНКП для згорання 1 кг порівняно з домішкою, можна очікувати збільшення значення індикаторного ККД ДВЗ і, відповідно, зменшення витрати БП. Зміну ТНКП для згорання 1 кг БП для різних ОК домішки k (k = 0 … 1) можна врахувати коефіцієнтом $1/(1–\Delta L_0 k)$.

НТЗ знаходиться в знаменниках виразів (2.2, 2.3) для визначення *A, B* і *C* та індикаторного ККД ДВЗ. Якщо відносну НТЗ домішки винести за дужки рівняння (2.1) та взяти до уваги, що у (2.4) вона знаходиться в знаменнику, але її зміна призводить до зміни СІТ в циліндрах ДВЗ, можна дійти висновку, що на витрату БП впливатиме складова $1/(1–\Delta H_H k)$.

Аналогічно, якщо НТЗ одного кг палива «основного» менша за НТЗ одного кг біодомішки, буде відбуватись зменшення витрати БП, що пропонується врахувати вищенаведеним коефіцієнтом.

Густина палива знаходиться в знаменниках *A, B, C* (2.2), (2.3). Виведенням за дужки густини біодомішки в (2.1) можна отримати, що на витрату БП ДВЗ АТЗ впливає вираз $1/(1–\Delta\rho_П k)$. $1/\left(1-\Delta\rho_П k\right)$, а якщо густина домішки більша за густину «основного» палива, буде спостерігатися зменшення витрати БП двигуном АТЗ.

Отже, зміна витрати БП відбуватиметься через зміну густини, ТНКП для згорання 1 кг БП та НТЗ і (2.1) можна подати у вигляді:

$$Q_{\text{БП}} = \frac{1}{(1-\Delta\rho_{\text{П}}k)(1-\Delta L_0 k)(1-\Delta H_H k)} Q \qquad (2.8)$$

Важливо, що при виборі домішок та їх ОК в БП в процесі експлуатації АТЗ, встановленні норм та під час контролю ВП потрібно врахувати зміну ТНКП для згорання 1 кг БП, густини, НТЗ та ОК біодомішки.

В процесах вибору біодомішок до ДП або бензину потрібно віддавати перевагу не тільки біодомішці меншої вартості, але й аналізувати коефіцієнт пропорційності в (2.8) між ВП АТЗ, що працює на паливі без біодомішок, та ВП АТЗ, що працює на БП з відомою ОК біодомішки *k*. Цей коефіцієнт враховує зміну вищеаналізованих властивостей БП за додаванням біодомішки ОК k, і для нього пропонується назва – КЗВ палив. Аналіз показує, що найкращою, з погляду зміни ВП, можна вважати біодомішку, з більшою густиною, ТНКП для згорання 1 кг та НТЗ порівняно з «основним» паливом.

Схема методу розрахунку показників паливної економічності автомобіля контролем витрат рідких БП, який дозоляє визначати норми витрат БП, контролювати їх витрати з врахуванням ОК біодомішки в експлуатації АТЗ наведена на рис. 2.5.

Метод передбачає умовне виділення групп параметрів: режимів руху, конструкції та умов руху АТЗ. Водночас можна виділити деякі параметри, що однозначно неможливо віднести лише до однієї групи (позначено кольором). Одним з таких параметрів є індикаторний ККД ДВЗ. Його величина залежить від конструкції двигуна, а також режиму його роботи. Наступним таким параметром є ПЧКП АТЗ. Цей параметр конструктивно закладений в трансмісію АТЗ, а також його значення залежить від конкретної передачі, вибраної водієм, який обирає конкретний режим руху.

В запропонованому методі окремо виділено параметри руху, до яких відносять: вагу АТЗ з вантажем або без нього, коефіцієнт опору дороги, параметри середовища, окремо на схемі виділено особливості

погодних умов. Зазначається, що на погодні умови та умови руху обдочасно впливають параметри середовища.

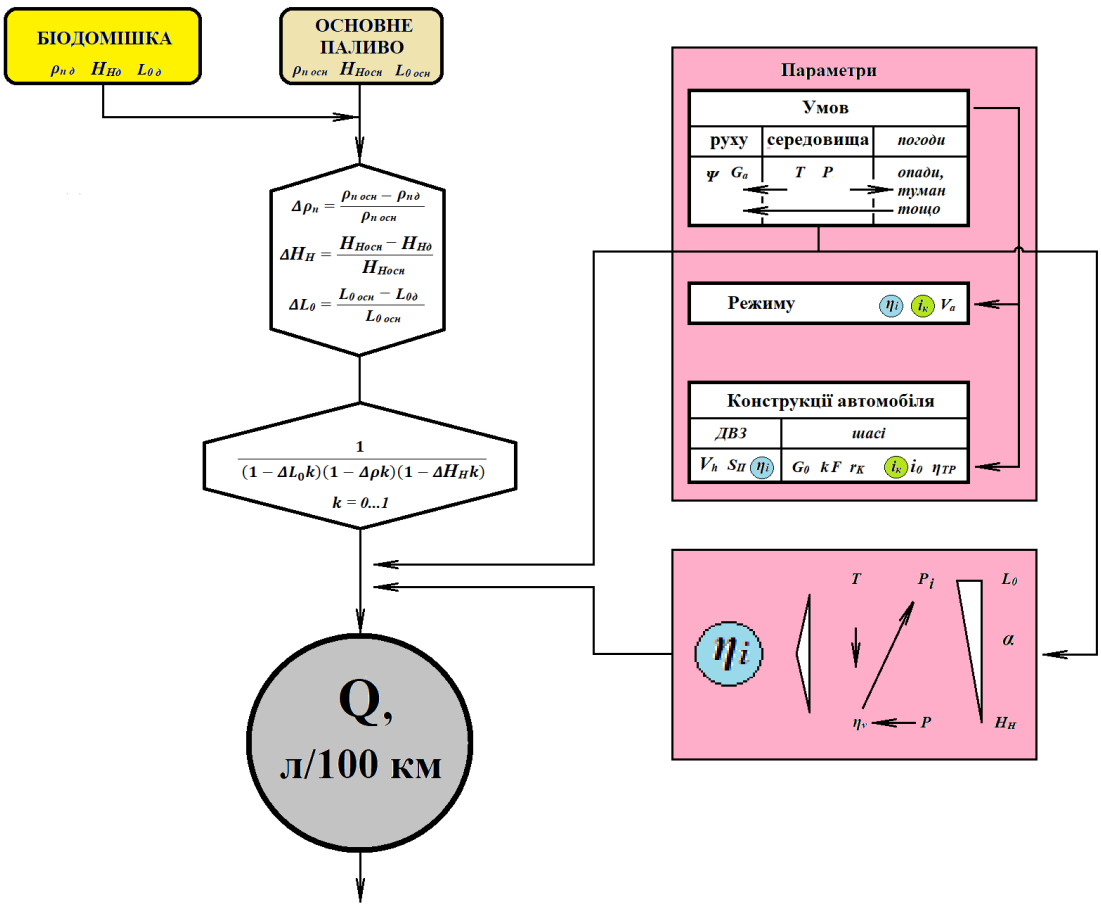


Рисунок 2.5 – Схема методу визначення та контролю витрат БП *Авторська розробка.*

Одночасно параметри умов впливають на параметри режиму (швидкість руху АТЗ, ПЧКП, індикаторний ККД ДВЗ). Вони одночасно впливають на вибрані для руху параметри конструкції та режиму руху. За цих обставин параметри умов середовища впливають на фізичні властивості палив та їх складових, що змінює величину витрат.

На рис. 2.5 окремо виділено взаємний зв’зок між параметрами, що впливають на індикаторний ККД ДВЗ. Зазначимо, що на СІТ в циліндрах ДВЗ впливають атмосферні тиск та температура,

коефіцієнт наповнення циліндрів, коефіцієнт надлишку повітря, властивості БП.

Метод розрахунку показників паливної економічності автомобіля контролем витрат рідких БП полягає в нижчевикладеному:
- за даними густини, НТЗ, ТНКП для згорання 1 кг біодомішки та аналогічних показників безнинів або ДП потрібно розрахувати відносні значення $\Delta\rho_n$, $\Delta H_н$, ΔL_0;
- прийняти значення ОК біодомішки k ($k=0$ – біодомішка відсутня, $k=1$
- як паливо використовується тільки біодомішка);
- розрахувати КЗВ БП з вибраною ОК біодомішки k;
- за відомих параметрів конструкції, параметрів та умов руху АТЗ отримати числове значення витрати даного БП.

Наведений метод та розроблена на його основі методика дозволили розрахувати КЗВ деяких БП на основі ДП та бензину (табл. Б.1, додаток Б), коефіцієнти отримано за (2.8).

За результатами розрахунків встановлено, що всі проаналізовані біодомішки мають меншу ТНКП для згорання 1 кг. Це пояснюється наявністю в їх складі кисню (кисневмісні біодомішки). Це можна вважати їх перевагою порівняно з іншими біодомішками. Порівняння густин БЕ та бензину показує їх практичну однаковість в широкому діапазоні температур, звідки можна дійти висновку, що густина обох зазначених складових не змінює витрату бензину з БЕ. Для БП на основі ДП можна дійти висновку – всі проаналізові біодомішки мають від'ємне значення $\Delta\rho$, тому збільшення витрати БП зі збільшенням ОК біодомішки відбувається васлідок зменшення НТЗ БП.

Практично всі проаналізовані біодомішки зі збільшенням їх ОК сприяють збільшенню витрати БП, отже, вибираючи їх ОК в БП, важливими є як вартість біодомішки, так і величина збільшєння витрати цього БП.

Згадані КЗВ БП доводять, що якщо використовувати як БП лише БЕ (*k=1*), його витрата підвищується на 63% порівняно з ВП, якщо використовувати лише бензин. Аналогічним чином, якщо як БП використовується $МЕРО_2$ (метилові ефіри жирних кислот рафінованої ріпакової олії, $\rho_{20^\circ C}$=874 кг/м^3, (*k=1*)) ВП збільшується на 23%.

2.4 Особливості контролю та нормування витрат палив з домішками біоетанолу

Ефективне використання БП для АТЗ неможливе без розробки обгрунтованих норм їх витрати, норм вмісту токсичних речовин у ВГ ДВЗ без аналізу змін надійності роботи ДВЗ.

Процес використання бензину з БЕ має такі обмеження:

- вартість БЕ;
- низька стабільність сумішей для кліматичних умов географічного регіону;
- потреба урахування міжнародних екологічних вимог до АТЗ, які передбачають обмеження сумарного вмісту оксигенатів;
- потреба, особливо для великих концентрацій БЕ, не тільки змінювати конструкцію систем ДВЗ (змащування, циліндро-поршнева група тощо), але й підтримувати потрібний рівень їх надійності;
- можливе нецільове використання БЕ виділенням його з БП.

Однак за ціноутворенням на БЕ та бензини сьогодні отримання додатної економічної ефективності такого використання не є можливим. І це відбувається за умов низької собівартості виробництва БЕ.

Бензоспиртові суміші мають високу гігроскопічність та схильність до розшарування, особливо за наявності води, що створює додаткові проблеми щодо їх використання. Як стабілізатори застосовують високомолекулярні спирти, за зростання ОК яких в БП

збільшується його гігроскопічна стійкість. Стабільність сумішей спиртів і бензинів обмежується наявністю від'ємних температур, за яких розшарування активізується. Дослідники Національного транспортного університету довели, що за температур, більших за -4 … -6 °С бензин з 6% БЕ відповідає вимогам [80, 124]. Стає очевидним, що нижчі (наведених значень) температури вимагають заходів контролю та запобіганню розшарування БП з БЕ.

Використання будь-яких БП для АТЗ сьогодні слід розглядати з урахуванням екологічних вимог ЄВРО, дотримання яких залежить також і від якості палива. Внаслідок цього національними та європейськими нормативами на бензини для бензинових ДВЗ, не адаптованих до роботи БП з БЕ, введено обмеження вмісту оксигенатів з гранично допустимим вмістом кисню – 2,7% за масою. Щоб дотриматися таких вимог, відсотковий вміст БЕ в БП не має бути більшим 8% за об'ємом.

Відомо, що використання бензинів з ОК БЕ до 6% вимагає незначних удосконалень системи живлення ДВЗ, а за ОК БЕ в 3–5% відсутня потреба в зміні конструктивних і регулювальних параметрів систем запалювання та/або живлення ДВЗ [80, 124, 137]. Слід взяти до уваги, що більші ОК БЕ можуть привести до втрати необхідних показників надійності ДВЗ.

Уряд України ще до 2010 року передбачав програмою «Етанол» переведення до 30% існуючого в країні парку АТЗ з двигунами з примусовим запалюванням на використання бензинів з БЕ. На жаль цього не відбулося, зокрема за об'єктивних причин. Але така проблема є актуальною і сьогодні та потребує обгрунтування впровадження контролю витрат рідких БП, вмісту токсичних речовин у ВГ двигуна, створення норм витрат, підвищення надійності його роботи. Розробка наукових основ створення методів розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем витрат БП,

зокрема для встановлення всіх видів норм витрат, удосконалення існуючих засобів їх контролю в процесі експлуатації АТЗ, а також за допомогою пристроїв, встановлених на АТЗ, є актуальною науково-прикладною проблемою.

В Україні ведеться науковий пошук створення теоретичних засад та практичних рекомендацій використання біопалив з БЕ [3, 65, 69, 80, 110, 117, 124–126, 137, 177-183, 186, 187]. Дослідження вказують, що використання такого БП перспективно на АТ, є дієвим чинником підвищення ефективності експлуатації АТЗ. Є потрібним створення математичного апарату, що дозволяє встановлювати основні та ДН ВП з БЕ, зокрема для обгрунтування діапазонів виміру їх витрат різними засобами.

Як було показано в [80, 81, 186], використання бензину з БЕ збільшує ВП двигуном АТЗ, що характеризується КЗВ, наведеним в (2.8). Треба зазначити, що густина БП з додаванням БЕ в бензин практично не змінюється. Це пояснюється дуже близькими значеннями густини БЕ та бензину.

Аналіз доводить, що присутність БЕ в бензині впливає на НТЗ цього БП внаслідок різних за значенням величин НТЗ бензину (близко 44 МДж/кг) та БЕ (26,8 МДж/кг).

НТЗ бензину з БЕ, МДж/кг:

$$H_{НБ+БЕ} = H_{НБ}(1 - 0{,}42k) \qquad (2.9)$$

де $H_{НБ}$ – НТЗ бензину, МДж/кг.

Зменшення енергетичної складової БП у ДВЗ з примусовим запалюванням можна скоригувати його цикловою подачею.

Домішка БЕ збіднює ППС, що пов’язано з різними значеннями ТНКП для згорання 1 кг бензину та БЕ –

14,7; …; 14,8 кг та 9; …; 9,05 кг, відповідно. Отже, за використання бензину з домішкою БЕ зміна ВП неминуча. Водночас вона відбувається в бік збільшення зі збільшенням концентрації БЕ в паливі, що потрібно враховувати для вибору діапазону виміру та контролю витрат вказаних БП.

2.5 Встановлення додаткових норм витрати біопалив

За допомогою КЗВ палив (табл. 2.1) можна отримати не тільки основну, але й ДН (на тонну вантажу, що перевезений на 100 км) витрати БП ДВЗ АТЗ.

З (2.1) основна H_0 та додаткова $H_Д$ норми ВП, наприклад, для бензину з БЕ, л/100 км:

$$H_{0_{\text{БЕ}}} = \frac{I_{\text{Б+БЕ}}}{\eta_i}\left[Ai_K + Bi_K^2 V_a + C(G_0\psi + 0{,}077kFV_a^2)\right], \quad (2.10)$$

де $I_{Б+БЕ}$ – КЗВ БП (бензин з БЕ),

G_0 – вага спорядженого АТЗ, Н.

ДН ВП на 1 т перевезеного на 100 км вантажу ($10^4 H_Д$), л/100 км:

$$H_{Д_{\text{Б+БЕ}}} = \frac{10^4 I_{\text{Б+БЕ}} C\psi}{\eta_i} = \frac{10^6 I_{\text{Б+БЕ}}}{\eta_i \text{Н}_{0_{\text{БЕ}}} \rho_{\text{Т}} \eta_{\text{ТР}}}\psi. \quad (2.11)$$

З (2.10) та (2.11) можна зробити висновок, що додаткова і ОН ВП за використання бензину з БЕ підвищується на 2,4%, що розширює діапазон можливих витрат вказаних БП.

КЗВ БП враховує зміну НТЗ палива залежно від концентрації БЕ, тобто пропорційно коефіцієнту в (2.8). За необхідності основну та

ДН витрати бензину з БЕ різних ОК можна визначити за класифікацією ХНАДУ для всіх груп експлуатації АТЗ. Для цього потрібно врахувати КЗВ БП. Наприклад, для ЗІЛ-431410, з даних урахуванням [131], за використання бензину з БЕ основна та ДН ВП завантаженого АТЗ для різних груп умов експлуатації будуть мати значення, наведені в табл. 2.1 та на рис. 2.6.

Таблиця 2.1 – Норми виитрати БП на основі бензину з домішками БЕ (ЗІЛ-431410)

Умови експлу-атації (група)	ОН (бензин), $Н_о$, л/100км	ОН (суміше-вий бензин), $Н_о$, л/100км	ДН (бензин), $Н_д$, л/100км	ДН (суміше-вий бензин), $Н_о$, л/100км	Витрата бензину (АТЗ заванта-жений), Н, л/100 км	Витрата сумішевого бензину (АТЗ заванта-жений), Н, л/100 км
I	24,1	24,7	1,8	1,8	28,2	28,9
II	26,2	26,8	2,2	2,3	31,1	31,9
III	30,4	31,1	2,8	2,9	36,6	37,5
IV	34,4	35,2	3,3	3,4	41,8	42,8
V	39,1	40,0	3,8	3,9	47,6	48,7

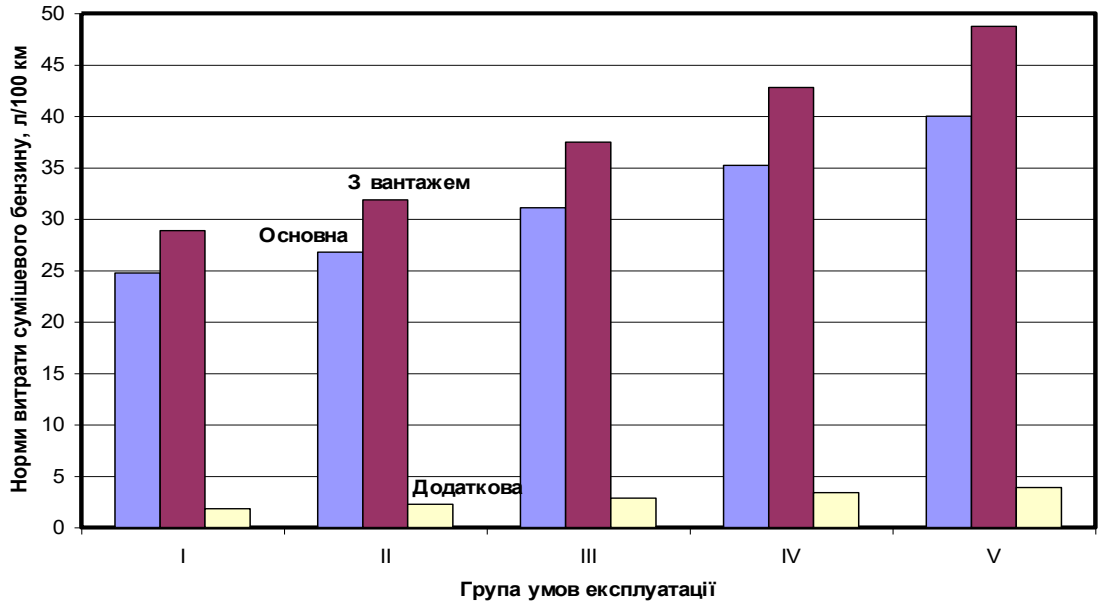


Рисунок 2.6 – Норми витрати бензину з БЕ для ЗІЛ-431410 для різних умов експлуатації

Авторська розробка.

Норми ВП АТЗ за використання БП з іншою ОК БЕ визначаються аналогічно. В експлуатації крім ЛН встановлюють питомі норми ВП для легкових автомобілів-таксі, вантажних автомобілів та автобусів.

Для вантажних АТЗ питома норма витрати бензину з БЕ з урахуванням [131] та (2.10, 2.11), визначається, л/т·км:

$$Q_Y = \frac{0{,}01 I_{\text{Б+БЕ}} K_T K_h}{V_a}\left[\frac{K_1 + K_2 V_a^3}{g\gamma\beta} + K_3 V_{max}\right], \qquad (2.12)$$

де K_T – КЗВ БП, що залежить від температури НС;

K_h – КЗВ БП, що залежить від висоти над рівнем моря;

V_a – максимальна швидкість АТЗ, км/год;

g – вантажопідйомність АТЗ, т;

γ – коефіцієнт використання вантажопідйомності;

β – коефіцієнт використання пробігу;

K_1, K_2, K_3 – коефіцієнти. (K_3 =1,06; ...; 1,18 для карбюраторних ДВЗ [131]).

$$K_T = 1 - 0{,}005t \qquad (2.13)$$

де t – температура НС, °С.

$$K_h = 1 + 0{,}0067 \cdot 10^{-3} h, \qquad (2.14)$$

де h – висота над рівнем моря, м.

$$K_1 = (AK_C V_{max} i_{\text{КП}} + BK_C^2 V_{max}^2 i_{\text{КП}}^2 + 0{,}01 C G_a V_{max})/\eta_i, \qquad (2.15)$$

$$K_2 = 0{,}077 CkF/\eta_i, \qquad (2.16)$$

З урахуванням (2.13)–(2.16), в кінцевому вигляді, ОН ВП за використання бензину з БЕ можна подати, л/100 км:

$$H_0 = I_{\text{Б+БЕ}}\left(\frac{K_1}{V_a} + \frac{K_2}{V_a^2}\right), \tag{2.17}$$

ОН за використання сумішевого бензину, л/100 км:

$$H_0 = 1{,}024\left(\frac{K_1}{V_a} + \frac{K_2}{V_a^2}\right), \tag{2.18}$$

ДН за перевезений вантаж, л/100 км:

$$H_{\text{Д}} = (106 \ldots 118) I_{\text{Б+ВКД}} \Psi = (71{,}5K + 107{,}6)\Psi, \tag{2.19}$$

або

$$H_{\text{Д}} = (106 \ldots 118) I_{\text{Б+ВКД}} \frac{V_{max}}{V_a} \approx (71{,}5k + 107{,}6)\frac{V_{max}}{V_a}, \tag{2.20}$$

Тоді ДН, за використання бензину з БЕ:

$$H_{\text{Д}} \approx 111{,}9\frac{V_{max}}{V_a} \tag{2.21}$$

Для АТЗ з причіпами за використання бензину з БЕ, з урахуванням вищенаведеного, л/т км:

$$Q_Y = 0{,}01 I_{\text{Б+БЕ}} K_T K_h \left(\frac{\text{Н}_0 + \text{Н}_\text{Д} G_{\text{пр}}}{q_{\text{ап}}\gamma\beta} + \text{Н}_\text{Д}\right), \tag{2.22}$$

де $G_{\text{пр}}$ – маса причепа, т;

$q_{ап}$ – вантажопідйомність АТЗ та причепа, т.

Для самоскидів, л/т км:

$$Q_Y = \frac{K_T K_h (H_0 + H_e Z_e)}{(100 - 39k) q_C \gamma \beta} \quad (2.23)$$

де Z_e – число їздок;

H_e – надбавка за їздку (0,25 л).

За погодинної оплати роботи вантажних АТЗ, л/т км:

$$Q_Y = \frac{I_{Б+БЕ} K_T K_h H_{ОП}}{q \gamma \beta}, \quad (2.24)$$

де $H_{ОП}$ – норма за погодинного обліку, л/100 км.

Аналогічно визначають питому ВП пасажирського АТЗ. Для автобусів, як і для вантажних АТЗ, можна встановити ОН порожнього автобуса і ДН на перевезення пасажирів. За умови, що середня маса пасажира дорівнює 75 кг, л/пас.км:

$$Q_Y = \frac{I_{Б+БЕ} K_T K_h (H_0 + H_Д)}{q_a \gamma_{СР} \beta}, \quad (2.25)$$

де $H_О$ – ОН для порожнього автобуса, л/100 км;

q_a – пасажиромісткість, пас.;

$\gamma_{СР}$ – коефіцієнт використання пасажиромісткості;

β - коефіцієнт використання пробігу;

$H_Д$ – ДН на перевезення пасажира на відстань 100 км, л/100 пас. км.

Середнє значення коефіцієнта використання пасажиромісткості:

$$\gamma_{CP} = \frac{Q_{CP}}{g_a} = \frac{N_n l_n}{g_a l_M}, \quad (2.26)$$

де N_n – кількість пасажирів, перевезених на маршруті;

l_n – середня довжина їздки пасажира, км;

l_M – довжина маршруту, км.

Отже, з урахуванням [131], ДН на перевезення одного пасажира автобусом з ДВЗ, що має примусове запалювання, л/100 пас км:

$$H_Д = \frac{1}{(6{,}67-2{,}6k)} = 0{,}094k + 0{,}144 \quad (2.27)$$

Для сумішевого бензину ДН на перевезення пасажира дорівнюватиме 0,153 л/100 пас км.

Підхід дослідників [131] дозволяє встановлювати ДН на перевезення одного пасажира автобусом за використання бензину з БЕ.

Для автомобілів-таксі, за використання бензину з БЕ, питома норма ВП, л/100 пас км складатиме:

$$Q_Y = \frac{I_{Б+БЕ} K_T K_h H}{100 g_T \gamma_T \beta_T}, \quad (2.28)$$

де H – норма ВП, л/100 км;

q_T – кількість місць в автомобілі-таксі;

γ_T – коефіцієнт наповнювання АТЗ;

β_T – коефіцієнт платного пробігу.

Питома ВП. за використання бензину з БЕ, на платний кілометр пробігу таксі, л/пл.км, розраховується за формулою:

$$Q_Y = \frac{I_{\text{Б+БЕ}} K_T K_h H}{100 \beta_T}, \quad (2.29)$$

На підприємствах АТ частіше використовують питому ВП, яку виражено в г/т·км, г/пас·км, г/пл·км.

2.6 Обгрунтування діапазонів вимірювання і контролю витрат біопалив

БП, заміщуючи частку палива нафтового походження, дозволяє замістити об'єми світлих нафтопродуктів, що стоживають АТЗ. Це має приводити до покращення важливих показників, в першу чергу, енергетичних та екологічних, але, на жаль, спостерігається не завжди.

До паливних домішок для ДВЗ можна віднести:

- продукти конверсії палива;
- водопаливні емульсії;
- водень;
- синтетичні спирти;
- ОРП та їх похідні.

Водопаливні емульсії дозволяють позитивно вплинути на вміст окису азоту у ВГ двигунів. Водень та продукти конверсії палива мають високі енергетичні властивості та вважаються перспективними для використання з погляду покращення економічних та екологічних показників ДВЗ [131].

Дослідження показують, що в процесі експлуатації АТЗ на рідких БП не завжди можна отримати позитивну економічну ефективність, і на цей результат можуть суттєво вплинути

собівартість біодомішок, дотаційна політика держави щодо вирощування їх сировини [5, 6].

Важливим напрямком заощадження нафтових палив можна вважати використання бензинів з БЕ, ДП з домішками РО, або з домішками ріпакового метилового ефіру. Провідні виробники АТЗ вже тривалий час випускають багато автомобілів, що працюють на БД [5, 74, 133, 136]. Як і в усьому світі, в країнах ЄС використання БД активно розвивається.

Основними забруднювачами атмосферного повітря є АТЗ з ДВЗ. Аналіз [80] дозволяє зробити висновок, що великий відсоток забруднення атмосфери припадає на вантажні, спеціальні нелегкові, автобуси, легкові АТЗ індивідуального використання. Треба зазначити, що щорічно зростає частка автомобілів з віком 10 років і більше, їх кількість кожний рік збільшується. Частка АТ в сумарних атмосферних викидах безпосередньо залежить від розвитку всіх сфер діяльності конкретного суспільства, рівня економічного розвитку, географічного розташування населених пунктів. Вплив АТ на загальну екологічну ситуацію в усьому світі значний, особливо у великих містах.

Останнім часом вчені розробляють наукові теоретичні основи та рекомендації щодо використання БП [5, 80, 124, 137], однак дослідження щодо контролю та нормування їх витрат на сьогодні не завершено.

Відомо, що використання палив в ДВЗ з домішками БП (невеликими за ОК) не вимагає переобладнання систем ДВЗ, але великі їх концентрації призводять до зниження належного рівня надійності систем та двигуна в цілому.

З [4, 5, 8] відомо, що за використання біопалив, що складаються з двох компонент, зміна їх витрат характеризується КЗВ БП. ВП АТЗ, що працює на двокомпонентному паливі, л/100 км:

$$Q_{\text{ОСН+АЛЬТ}} = I_{\text{ОСН+АЛЬТ}} + Q_{\text{ОСН}}, \quad (2.30)$$

де $I_{\text{ОСН+АЛЬТ}}$ – КЗВ двокомпонентного палива;

$Q_{\text{ОСН}}$ – ВП АТЗ, що працює на основному паливі, л/100 км.

Для ДП з домішками РО КЗВ БП [6]:

$$I_{\text{ДП+РО}} = 1 + 0{,}06k, \quad (2.31)$$

де k – ОК домішки, $k=0…1$.

Для отримання узагальненого КЗВ двокомпонентного палива запропоновано використання категорій (2.5–2.7).

Розробку науково обґрунтованих діапазонів витрат двокомпонентних палив можна провести на основі рівняння (2.1), в якому коефіцієнти А, В. С для палива на основі бензину розраховують згідно з (2.2) [131].

ТНКП входить в чисельник виразу визначення індикаторного ККД ДВЗ, а також в знаменник відомого виразу для визначення коефіцієнта надлишку повітря [131]. За додавання біодомішок, які мають відміннну ТНКП для згорання 1 кг від аналогічного показника «основного» палива, відбуватиметься зміна складу суміші, що потрапляє в циліндри ДВЗ. Якщо припустити, що за наявності біодомішки швидкісний режим роботи ДВЗ залишається сталим, така зміна має бути скомпенсована зміною навантажувального режиму. Отже, на ВП буде впливати тільки зміна ТНКП для згорання 1 кг БП, яка знаходиться в чисельнику (2.4), а за умови, що «основне» паливо має меншу ТНКП для згорання 1 кг, ніж біодомішка, буде відбуватись зменшення витрати двокомпонентного палива. Враховуючи наведене

в [4, 7, 8] на (2.6) вплив ТНКП для згорання 1 кг двокомпонентного палива запропоновано врахувати виразом $1/(1-\Delta L_0 k)$.

НТЗ входить у знаменники виразів для визначення індикаторного ККД двигуна, коефіцієнтів *A, B* і *C* в (2.2), (2.3). Якщо відносну НТЗ в (2.7) винести за дужки рівняння ВП (2.1) та врахувати, що у виразі для визначення індикаторного ККД ДВЗ вона знаходиться у знаменнику, але її зміна сприяє одночасній зміні СІТ, можна зробити висновок, що на витрату двокомпонентного палива чинить вплив вираз $1/(1-\Delta H_H k)$. Отже, якщо НТЗ «основного» палива менша за НТЗ біодомішки, відбуватиметься зменшення ВП.

Густина палива знаходиться в знаменниках виразів для коефіцієнтів *A, B, C* (2.2), (2.3). Якщо відносну густину домішки (2.6) винести за дужки в (2.1), можна з'ясувати, що на ВП ДВЗ АТЗ впливая складова $1/(1-\Delta\rho_T k)$. Таким чином, менша густина «основного» палива, відносно густини біодомішки, сприятиме зменшенню витрати двокомпонентного палива.

Відомо, що діапазон вимірювання ВП двигуном АТЗ залежить від виду палива, що використовується, а також режимів роботи двигуна (табл. Б.1, додаток Б). Як видно з наведених там даних теоретичне максимальне збільшення ВП дизелем відносно ДП скаладає для РО 6%, а для RME німецького виробництва, з вмістом ерукової кислоти С22:1 0,6% та густиною $\rho_{20^\circ C}$ = 877 кг/м^3) 23%. А для палив на основі бензину з вмістом БЕ максимально можливе збільшення витрати складає 63%. Це в експлуатації зумовлює діапазони ВВ БП за допомогою витратомірів.

Відомо, що питома ВП ДВЗ залежить від його типу та кількості циліндрів. Якщо врахувати зміну витрат БП та сумішей на їх основі, за умови відсутності збільшення ВП внаслідок погіршення технічного стану двигуна (зношувальні процеси, поява несправностей тощо) та з

урахуванням відомих даних щодо питомих ВП ДВЗ, можна отримати такі максимальні значення витрат БП для різних їх типів (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Розраховані максимальні значення витрат БП для різних типів ДВЗ

ДВЗ	Питома ефективна ВП, г/кВт·год			
	Бензин	Етанол	ДП	РО
З електронним впорскуванням палива	200–290	326–473	-	-
Карбюраторні	230–310	375–505	-	-
Дизелі з нерозділеними камерами згорання	-	-	200–235	212–249
Вихрокамерні і передкамерні дизелі	-	-	220–260	233–276

Отримані значення витрат БП дозволяють запропонувати діапазони вимірювання і контролю витрат рідких БП відповідними засобами.

2.7 Теоретичні передумови зменшення витрат палив з біодомішками

Використовуючи БП зміна їх витрат неминуча внаслідок зміни його густини, ТНКП для згорання 1 кг палива та НТП.

На основі (2.8) можна встановити, що ВП зменшується, коли коефіцієнт пропорційності менший одиниці. Тоді умову зменшення витрати двокомпонентного БП можна подати формулою:

$$(1 - \Delta L_0 k)(1 - \Delta \rho k)(1 - \Delta \mathrm{H_H} k) > 1 \qquad (2.32)$$

Так, за допомогою (2.32) можна проводити аналіз витрат різних рідких БП експлуатованими АТЗ та їх відносне порівняння. Наведені міркування дозволили встановити КЗВ деяких двокомпонентних рідких БП на основі ДП та бензину (табл. Б.1, додаток Б).

З (2.32) шляхом перетворень можна отримати:

$$1 - k(\Delta\rho + \Delta L_0 + \Delta H_H) + k^2(\Delta\rho\Delta H_H + \Delta L_0\Delta H_H + \Delta\rho\Delta L_0) - k^3(\Delta\rho\Delta L_0\Delta H_H) > 1 \quad (2.33)$$

Оскільки концентрація домішки k знаходиться в межах 0 … 1, можна зробити висновок, що вплив другого доданка нерівності (2.33) на ВП найбільший.

Отже, пропонується суму відносних ТНКП для згорання домішки у 1 кг двокомпонентного БП, густини та НТЗ домішки назвати *критерієм витрати БП*, умову зменшення його витрати можна сформулювати: *зменшення витрати БП АТЗ досягається, якщо критерій ВП від'ємний*:

$$\Delta\rho + \Delta L_0 + \Delta H_H < 0 \quad (2.34)$$

2.8 Перевірка адекватності розробленого методу визначення та контролю витрат біопалив

Актуальність пошуку і використання альтернативи паливам нафтового походження для ДВЗ сьогодні не викликає сумнівів. Однією з таких альтернатив є використання ДП з домішками РО або ефірів (етилових, метилових) на їх основі. В багатьох країнах світу використання палив, що мають в своєму складі БС, є актуальним також за зростання дефіциту палив нафтового походження та у зв'язку

з погіршенням екологічної ситуації, що особливо важливо для України, яка веде активну боротьбу з російською агресією [65].

Низка європейських країн, як і наша країна, мають екологічні проблеми та дефіцит власних ресурсів нафти, тому взялися за освоєння палива, в склад якого входить РО. На сьогодні провідні виробники випускають автомобілі, що надійно працюють на БД – продукті переробки рослинної олії. Використання БД сприяє зменшенню викидів CO_2, СО та сажі, зміні окислів азоту у відпрацьованих газах двигуна залежно від конструктивних його особливостей.

2.8.1 Відносна похибка розрахунків та експериментальних даних використання дизельного палива з домішками ріпакової олії

Експериментальні дослідження щодо використання БП ведуться в багатьох країнах світу, і наша країна не є винятком. Як підсумок цих досліджень встановлено, що домішка ріпаково-метилового ефіру в 5% за об’ємом до ДП практично не впливає на довговічність дизеля та призводить до незначного збільшення витрат такого палива. Розрахунки показують, що витрата ДП з 5% домішки за об’ємом ріпаково-метилового ефіру збільшується лише на 0,6%.

Стендові та натурні дослідженя показують, що робота двигунів на сумішах ДП та РО з ОК 10–30% призводить до збільшення питомих витрат вказаних БП на режимах середніх та великих навантажень до 2–5% (протокол проведених досліджень наведено в додатку Д).

В дисертаційній роботі запропонований метод визначення та контролю витрат БП з різною ОК біодомішок, що полягає в попередньому визначенні КЗВ БП, який враховує зміну ФХВ та ОК БС в ньому [20].

За цим методом проведено розрахунки витрати БП (ДП + 15% та + 30% за об’ємом РО) двигуном автомобіля ГАЗ-33060 в діапазоні

швидкостей його руху 65–95 км/год. За основу розрахунків були вибрані експериментальні дані витрат ДП цього автомобіля, що встановлений на стенді з біговими барабанами (рис. 2.7). Дані витрат отримано об’ємно-ваговим методом [9].

За результатами розрахунків та експериментальних досліджень з використання ДП та БП на його основі з додаванням 15% за об’ємом РО (табл. 2.3) побудовано графічні залежності (рис. 2.8) витрат вказаного палива від швидкості автомобіля.

Рисунок 2.7 – Експериментальні дослідження витрат БП автомобілем ГАЗ-33060 на стенді з біговими барабанами

Авторська розробка.

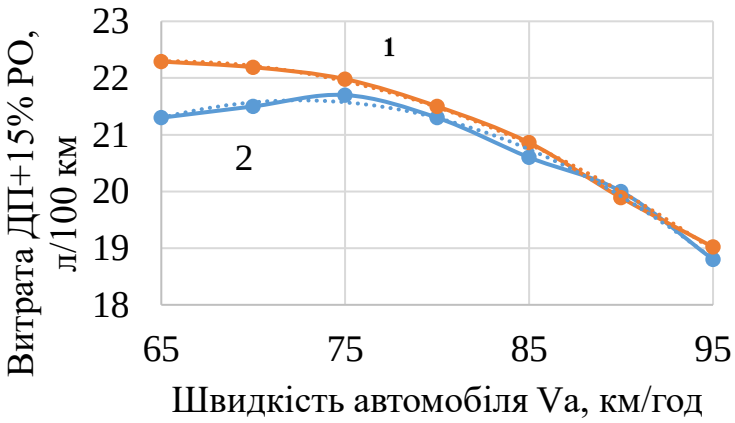


Рисунок 2.8 – Витрата БП (ДП + 15% за об’ємом РО) автомобіля ГАЗ-33060 від швидкості його руху: 1 – розрахункова;

2 – експериментальна

Авторська розробка.

Таблиця 2.3 – Результати визначення та контролю витрат БП за використання ДП з домішкою 15% ріпакової олії

Показник		Швидкість, км/год						
		65	70	75	80	85	90	95
Витрата палива (експери-мент), л/100 км	ДП	21,8	21,7	21,5	20,4	20,4	19,45	18,6
	ДП з 15% доміш-кою РО	21,2	21,5	21,7	21,3	20,6	20,0	18,8
Витрата ДП з 15% домішкою РО (розрахунок), л/100 км		22,29	22,19	21,98	20,86	20,86	19,89	19,02
Відносна похибка, %		4,89	3,11	1,27	2,07	1,25	0,56	1,07
Середня відносна похибка, %		2,03						

Рівняння апроксимації залежності 1 (рис. 2.8), отриманої розрахунковим методом з достовірністю $R^2 = 0,998$, матиме наступний вигляд:

$$Q^P_{ДП+15\%\ РО} = -0,0038V_a^2 + 0,4963V_a + 6,0686 \qquad (2.35)$$

Рівняння апроксимації залежності 2 (рис. 2.8), отриманої експериментально з достовірністю $R^2 = 0,992$:

$$Q^{E}_{ДП+15\%\ РО} = -0{,}0058V_a^2 + 0{,}8412V_a - 9{,}1143 \qquad (2.36)$$

Таблиця 2.4 – Результати визначення та контролю витрат БП на прикладі ДП з домішкою 30% РО

Показник		Швидкість, км/год						
		65	70	75	80	85	90	95
Витрата палива (експери-мент), л/100 км	ДП	21,8	21,7	21,5	20,4	20,4	19,45	18,6
	ДП з +30% доміш-кою РО	21,5	21,9	22,1	21,8	21,5	21,1	20,4
Витрата ДП з домішкою 30% РО (розрахунок), л/100 км		22,76	22,65	22,45	21,9	21,3	20,31	19,42
Відносна похибка, %		5,54	3,31	1,56	2,29	0,93	3,74	2,84
Середня відносна похибка, %		2,89						

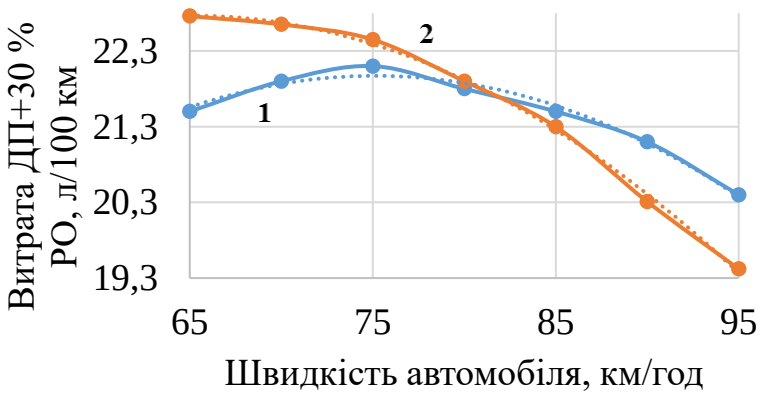


Рисунок 2.9. – Залежність витрати БП (ДП +30% РО) автомобіля ГАЗ-33060 від швидкості його руху: 1 – експериментальна; 2 – розрахункова

Авторська розробка.

Рівняння апроксимації залежності (рис. 2.9), отриманої розрахунковим методом з достовірністю $R^2 = 0,998$:

$$Q^P_{ДП+30\%\ РО} = -0,0038V_a^2 + 0,4925V_a + 6,7486 \quad (2.37)$$

Рівняння апроксимації залежності (рис. 2.9), отриманої експериментально з достовірністю $R^2 = 0,98$:

$$Q^E_{ДП+30\%\ РО} = -0,004V_a^2 + 0,6083V_a - 0,8857 \quad (2.38)$$

Аналіз отриманих даних дозволяє стверджувати, що розроблений метод визначення і контролю витрат БП має достатню узгодженість з результатами, що їх отримано експериментально, відносна похибка розрахунків та експериментальних даних не перевищує 3%.

2.8.2 Порівняння розрахункових та експериментальних даних витрат бензину з домішками біоетанолу

Авторами [187] отримано результати стендових випробувань двигуна VW BBY (4Ч 7,65/7,56) з примусовим запалюванням потужністю 55 кВт за використання бензинів та палива Е50, що мають в своєму складі домішку етилового спирту 50% за об'ємом. Аналіз отриманих показників роботи двигуна дає змогу стверджувати, що за практично незмінної витрати повітря ДВЗ і коефіцієнті наповнення за роботи на БП Е50 ВП більша в середньому на 21,6% порівняно з витратою бензину. Автори роблять висновок, що це пов'язано з відмінністю теплоти згорання палив, з чим можна погоджуватись, але також потрібно враховувати зміну ТНКП для згорання сумішевого

палива, що частково може скоригувати система керування подачею палива, задача якої – забезпечити практично стабільне значення коефіцієнта надлишку повітря.

Розрахунок за методом, що його розроблено в дисертаційній роботі, з використанням категорій відносна густина домішки, відносна НТЗ та відносна ТНКП для згорання 1 кг домішки до нафтового рідкого палива показує, що, з урахуванням ОК етилового спирту, ВП для палива Е50 буде збільшуватись на 24,2%. Потрібно зазначити, що великий вміст біодомішок в паливі може суттєво впливати на процес сумішоутворення, який в такому випадку потребуватиме коригування та вдосконалення, щоб зменшити втрати енергії палива, що згоряє.

В [80] автор наводить результати проведених дорожніх випробувань автомобіля ЗАЗ-110307 «Славута»: витрата палива у тепловому еквіваленті сумішей бензину та етанолу з вмістом 10% і 20% за об’ємом БЕ зростає на 4% і 10,5%, відповідно.

Розрахунок розробленим методом показує зростання витрати палива на 4,06% для вмісту БЕ в бензині 10% за об’ємом і на 8,5% для вмісту 20%.

2.9 Концепція нових підходів до забезпечення паливної економічності автомобілів розробкою наукових основ оцінювання витрат біопалив з урахуванням фізико-хімічних властивостей і концентрацій біодомішок

2.9.1 Загальні положення

В умовах ринкової економіки потрібно створення альтернативних варіантів забезпечення товаровиробників надійними машинами та організації ефективного обслуговування в процесі їх експлуатації. Виникає потреба заміни традиційних видів рідких палив

на палива біологічного походження, які мають низку переваг порівняно з традиційними мінеральними: можливість виробництва з відновлюваної сировини і сільськогосподарських продуктів, карбонова нейтральність, екологічність, повна біологічна розчинність за атмосферних умов тощо.

Експлуатація машин на паливі біологічного походження вимагає використання нових обґрунтованих нормативів і контролю витрат БП з різною ОК різних біологічних складових в них.

Засоби контролю побудовані на новій елементній базі. Розроблені технології контролю мают ь підвищену точність та швидкодію вимірювань, зменшення та унеможливлення похибок.

Ефективність використання БП передбачає наявність інформації про ФХВ палива, біодомішки та концентрації біодомішки у БП у вигляді баз даних та комп'ютерних програм, що підвищує її достовірність.

2.9.2 Принципи побудови концепції

Принципи побудови концепції полягають в узагальненні та вдосконаленні відомих наукових основ і розробці нового методу розрахунку параметрів управління паливною економічністю автомобілів, які дозволяють враховувати зміну ФХВ БП залежно від концентрації біологічної складової (біодомішки) в ньому. В концепції передбачено обґрунтування доцільності введення нових категорій: відносна густина біодомішки, відносна НТЗ та відносне ТНКП для згорання 1 кг біодомішки, що сприятиме підвищенню точності контролю витрат БП.

Запропоновано нові підходи і розроблений метод оцінювання зміни густини, НТЗ та ТНКП для згорання 1 кг БП залежно від ВП АТЗ, що працює на нафтовому рідкому паливі та ВП АТЗ, що працює на БП з відомою ОК біодомішки.

Встановлено взаємозв’язок між ФХВ БП з відомою ОК відомої за властивостями біодомішки та умовою зменшення витрати БП автомобіля, який дозволяє покращити показники його паливної економічності контролем витрат рідких БП.

2.9.3 Методологічні основи концепції

Методологічні основи концепції базуються на введенні та використанні нових категорії: відносна густина $\Delta\rho$, відносна НТЗ ΔH_u домішки та відносна ТНКП для згоряння 1 кг домішки до біопалива ΔL_0, які дають можливість розрахунку показників паливної економічності автомобілів, контролювати витрати рідких БП, нормувати витрати таких БП, сформулювати умову зменшення витрат БП ДВЗ АТЗ, порівнювати та вибирати БП з різними біодомішками різних ОК з погляду їх витрат.

2.9.4 Елементна база моніторингу витрат біопалив

Обгрунтована конструкція ТАВ, що передбачає використання нових елементів: зовнішнього ТП, НП з БПМ та ЕОМ, БЛ, ЛА та обчислення витрати, груп ТП по різні боки від НЕ, НЕ на вході в ТАВ з БКТ, трубки ЗПП з блоком віднімання, послідовно встановлених трубок різних діаметрів, що підбираються певним чином з одночасним аналізом їх роботи, що, в кінцевому підсумку, забезпечує підвищення точності та швидкодії вимірювання та КВБ, розширення діапазону вимірювання витрат, номенклатури палив та функціональних можливостей ТАВ щодо автоматизації процесів вимірювання та контролю.

Конструкція витратоміра розроблена шляхом моделювання теплового балансу НЕ в рухомому потоці палива. Для поширення технологічних можливостей і підвищення точності вимірювань у разі ламінарного й турбулентного режимів потоку палива температура $T(x)$

БП вимірюється в декількох точках потоку і використовується процедура ЛА.

Повна чутливість ТАВ для заданої витрати БП визначається сумою різниць значень температур між сусідніми послідовно встановленими ТП.

Послідовно встановлені трубкі з певним співвідношенням діаметрів впливають на швидкість потоку БП в широкому діапазоні, що розширює діапазон ВВ і підвищує точність вимірювання цих витрат.

2.9.5 Ефективність концепції

БП виробляється з біологічної енергетичної сировини. Воно може використовуватися самостійно, а також як складова або сировина для виготовлення сумішевих палив змішуванням з традиційними видами палива нафтового походження з урахуванням встановлених нормативів.

Важливими факторами, що стимулюють розвиток біопаливного ринку, є:

- зростання екологічних вимог і потреба у зменшенні викидів парникових газів, оскільки БП вважається більш екологічно чистим видом палива тому, що отримується з відновлюваних джерел енергії;
- інновації та технологічні досягнення – розробляються нові технології, які дозволяють більш ефективно та економно виробляти БП з різних видів сировини.

Ефективність концепції забезпечується приладами, для чого розроблено:

- ТАВ, що здатний працювати в умовах руху АТЗ з потрібним рівнем надійності, його використання є можливим і не потребує додаткових досліджень. Робота ТАВ забезпечує більш широкий діапазон дорожніх і транспортних умов експлуатації АТЗ. Відносна похибка

ВВ палива на маршруті руху автомобіля Citroen Berlingo з дизельним двигуном об’ємом 1,9 л, що визначено за допомогою ТАВ та об’ємним способом, на маршруті протяжністю 1,2 км склала 2,8%. Діаметр НЕ в трубці ТАВ впливає на похибку вимірювання. Витрати палива та зменшення його діаметра дозволяє знизити цю похибку в 1,2–1,6 раза;

- високоточний ТАВ з цифровою обробкою вимірюваної інформації, який дозволяє застосуванням корекції ДНП та врахуванням значень ФХВ БП підвищити точність вимірювань ВП у 1,5; ...; 1,8 раза;

- калориметричний ТАВ БП з цифровою обробкою інформації, який дозволяє автоматизувати процес та підвищити точність вимірювання ВП в 1,2–1,4 раза введенням БЛ, ЛА, обчисленням ВП; ТП, що розміщений у потоці БП поза зоною дії НЕ прототипу, двох груп ТП, розташованих по різні боки від НЕ прототипу, причому ТП у групах розміщено один за одним на визначених відстанях від даного НЕ;

- два калориметричних ТАВ моторного палива з підвищеною точністю вимірів, які здатні зменшувати похибку, порівняно з прототипом, на 7–19% завдяки введенню БКТ, вхідний нагрів прямого та ЗПП, що забезпечує можливість коригування температури палива на входах трубок прямого та зворотного потоків палива, а також завдяки введеній компенсації похибок температурного струмопідведення, в’язкого тертя, сили тяжіння. Запропоновані витратоміри здатні інтегруватись в усі сучасні системи живлення ДВЗ з ЗЗП в бак.

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано ввести такі нові категорії: відносна густина $\Delta\rho$, відносна НТЗ ΔH_u домішки та відносна ТНКП для згоряння 1 кг ΔL_0 домішки в БП, які дають можливість сформулювати умову зменшення

витрати БП ДВЗ АТЗ і порівнювати та вибирати БП з різними домішками різних ОК з погляду зміни їх витрати АТЗ.

2. Запропоновано метод і його структурно-логічну схему визначення та контролю витрат БП АТЗ, що рухається на відомих режимах у відомих дорожньо-транспортних умовах та має відомі конструктивні параметри. Метод полягає в розрахунку значення запропонованого КЗВ БП, який враховує зміну густини, НТЗ та ТНКП для згорання 1 кг БП залежно від ОК БС в ньому.

3. В розробленій структурно-логічній схемі проаналізовано взаємозв'язок між параметрами (умови та режими руху, конструкція АТЗ, властивості БП з різною ОК БС), що дозволяє покращити систему контролю витрат БП та підвищити ефективність її використання.

4. Встановлено, що при збільшенні концентрації біодомішок в паливі (бензині або дизельному) збільшення його ВП АТЗ відбувається, переважно, за рахунок зменшення енергетичної складової БП. Однак всі проаналізовані АД (до бензину та ДП) призводять до збільшення витрати БП зі зростанням концентрацій домішок.

5. Встановлено, що, з погляду можливих витрат БП, більш привабливою для АТЗ з дизельними ДВЗ є ДП з домішками РО. Для сумішевого бензину з вмістом БЕ в 6% за об'ємом можна очікувати збільшення витрати на 2,4%, а за використання палива, що має в своєму складі лише БЕ, – на 63%.

6. Отримано числові значення номінальної питомої ВП бензинових (карбюраторних та з електронним впорскуванням палива) і дизельних (з нерозділеними камерами згорання, вихрокамерні та передкамерні) двигунів, що працюють на БП з різним вмістом домішок (БЕ, РО), які потрібно враховувати, вибираючи діапазон виміру витрат БП.

7. Доведено, що найбільш привабливими, з погляду витрат БП АТЗ, є домішки, що мають більшу, порівняно з рідким нафтовим паливом, густину, НТЗ та ТНКП для згорання 1 кг.

8. Запропоновано критерій зміни витрати БП: зменшення витрати відбувається, якщо значення $\Delta\rho+\Delta L_0+\Delta H_H$ від'ємне, а кількісне значення витрати БП залежить від концентрації біодомішки та визначається запропонованим КЗВ.

9. Розрахунковим методом отримано залежність витрати БП на основі ДП з додаванням 15% та 30% за об'ємом РО в діапазоні швидкостей руху автомобіля ГАЗ-33060 на стенді з біговими барабанами 65–95 км/год, яка дозволяє враховувати вказані витрати в процесі експлуатації цього АТЗ для їх визначення, контролю, аналізу, планування, створення норм тощо. Аналіз отриманих розрахункових даних витрат БП на основі ДП з додаванням 15% та 30% за об'ємом РО показує адекватність розробленого методу визначення та КВБ з використанням КЗВ БП, що враховує зміну густини, НТЗ та ТНКП для згорання 1 кг БП та ОК РО в ньому. Відносна похибка розрахункових та експериментальних даних в діапазоні вказаних швидкостей руху автомобіля ГАЗ-33060 на стенді з біговими барабанами не перевищує 2,05%.

10. Дорожні випробування автомобіля ЗАЗ-110307 «Славута», проведені дослідниками Національного транспортного університету з використанням палива з домішками 10 та 20% за об'ємом БЕ, показують зростання витрат вказаних палив на 4% і 10,5%, відповідно. Розрахунок запропонованим методом показує збільшення згаданих витрат на 4,06 та 8,5%, що показує задовільну збіжність результатів експериментальних і результатів та розрахунків запропонованим методом.

11. Результати проведених досліджень дозволили сформулювати концепцію методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем витрат рідких БП.

РОЗДІЛ 3
ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ БІОПАЛИВ

3.1 Аналітичний огляд методів вимірювання витрати рідини та конструкцій існуючих витратомірів

У процесі експлуатації АТЗ вимірювання миттєвої та сумарної ВП дає можливість вибирати економічні маршрути їх руху, оцінювати собівартість виконаної роботи, навчати економічним прийомам керування АТЗ, своєчасно визначати їх технічний стан тощо. В умовах різкого підвищення попиту на палива та енергоресурси взагалі, кожний перевізник хоче знати свої витрати енергоресурсів. Водночас точність їх виміру та контролю, будь то бензин, ДП, БП тощо, має першорядне значення [119].

Також важливе значення в процесі експлуатації АТЗ має автоматизація процесу контролю ВП. Це дозволяє зробити сучасні МП системи, що інтегруються в систему живлення ДВЗ, але їх використання на АТ значною мірою визначається можливостями наявних або розроблюваних вимірювальних приладів (витратомірів).

Відомо, що за витрату рідкого палива приймають його кількість (за масою або об’ємом), яка проходить через поперечний переріз паливопроводу за одиницю часу. Відповідно, об’ємну (м^3/год) та масову (кг/год) витрати визначають за формулами:

$$Q_V = \frac{V}{t}, \qquad Q_M = \frac{m}{t} \tag{3.1}$$

де V – об’єм палива, що пройшло через переріз паливопроводу, мм^3;

m – маса палива, що пройшло через переріз паливопроводу, г;

t – час проходження палива, сек.

Значення таких витрат можуть знаходитися в дуже великих діапазонах. Особливо це стосується АТЗ, де ДВЗ відносно великого літражу споживає як невелику кількість палива, наприклад, в режимі холостого ходу, так і до декількох літрів за хвилину (режим розгону АТЗ). В той же час палива, особливо БП, можуть суттєво відрізнятися за своїми ФХВ і такий факт потрібно враховувати у процесі експлуатації АТЗ на різних БП. Все це, в поєднанні з різними умовами експлуатації АТЗЮ висуває специфічні вимоги щодо точності вимірювання, швидкодії, надійності роботи витратомірів та розширення їх функціональних можливостей.

3.1.1 Метод диференціального тиску

Витратоміри, що реалізують такий метод, найбільш придатні для виміру витрат рідин. Принцип дії таких витратомірів полягає в тому, що спад тиску в потоці рідини пропорційний квадрату швидкості потоку. Отже, вимірюючи диференціальний тиск в потоці, отримують значення витрат. Ці витратоміри складаються з таких частин: перша впливає на кінетичну енергію рідини, друга – вимірює диференціальний тиск.

Для виміру параметрів потоку рідини в витратомірах диференціального тиску застосовують перешкоди типу вставок, сіток тощо. Перешкода чиніть опір потоку рідини та створює різніцю тисків до та після неї.

Найбільш розповсюдженою вставкою є трубка Вентури, яка поступово зменшує діаметр. Тиск вимірюють на початку звуження та у найвужчій частині трубки. Далі ДТ Вентури розширюється до вихідного, що веде до відновлення тиску в паливопроводі до значення на вході трубки. Така конструкція витратоміра краще підходить для

трубопроводів великих діаметрів, а головний недоліком витратомірів, що реалізують такий метод, є відносно малий діапазон ВВ.

3.1.2 Вихровий метод

В основі вихрового методу та роботи витратоміра такого типу лежить принцип Кармана: коли потік рідини обтікає перешкоду, в потоці по краях завади виникають завихорення. Частота цих завихорень пропорційна швидкості рідини. Вихрові витратоміри забезпечують достатню точність на швидкостях потоку 2–40 м/сек., але зовсім не підходять для виміру витрат в'язких рідин, що накладає обмеження для виміру витрат БП, наприклад, з домішками ОРП, оскільки останні мають відносно більшу в'язкість, ніж бензини або ДП.

3.1.3 Ультразвуковий метод

Ультразвуковий метод та принцип роботи таких витратомірів полягає в тому, що ультразвуковий імпульс, спрямований в напрямку потоку, має швидкість звука плюс швидкість руху рідини. А імпульс, що йде в протилежному напрямку, має швидкість меншу на величину швидкості потоку. За допомогою ультразвукового випромінювача та ультразвукових датчиків вимірюється час проходження акустичних сигналів в напрямку та проти напрямку потоку. Разниця в часі пропорційна середній швидкості потоку. Використання цього методу обмежується складністю апаратної частини витратомірів.

3.1.4 Масовий (коріолісовий) метод

Існує велика кількість моделей витратомірів, що використовують масовий метод, але найбільше расповсюдження отримали витратоміри, що враховують сили Коріоліса. Коріолісові витратоміри вимірюють масову витрату, в той же час, як інші частіше

вимірюють об’ємну витрату. Оскільки маса рідини незмінна, немає потреби його налаштування залежно від зміни властивостей рідини (внаслідок зміни концентрації домішок в паливі, температури, тиску тощо), що робить їх привабливими для виміру витрат БП на АТЗ.

Сили Коріоліса проявляються в системах, коли рідина рухається в напрямку осі коливань. Вимірювальна система такого витратоміра складається з однієй або двох трубок прямокутної або кривої форми. Вимірювальна трубка приводиться в резонанс за допомогою електромагніта. Коли швидкість потоку дорівнює нулю, сила Коріоліса дорівнює нулю. Коли потік рухається, частки рідини на різних ділянках трубки періодично прискорюються чи уповільнюються, відповідно, сила Коріоліса утворюється частинками, які рухаються нерівномірно, що викликає назначну деформацію трубки. Ця деформація прямо пропорційна масовій витраті. Деформація фіксується датчиками, але, оскільки характеристики коливань трубки залежать від температури, її потрібно постійно вимірювати та проводити коригування показів витратоміра. Треба зазначити, що коріолісові витратоміри мають відносно великий діапазон ВВ, але досить складну конструкцію. Тому їх використання на АТ обмежено.

3.1.5 Електромагнітний метод

Принцип дії електромагнітного методу ВВ та витратомірів такого типу заснований на законі електромагнітної індукції. Якщо рідина є провідником струму, а магнітне поле утворюється котушками, розташованими навколо трубки, напруга, що виникає, пропорційна швидкості потоку. Напруга вимірюється за допомогою електродів, що вмонтовано в стінки трубки. Але електромагнітні витратоміри вимірюють ВП, якщо вони проводять електричний

струм. До таких палив можна віднести лише БЕ [81], а більшість інших БП є діелектриками.

3.1.6 Тепловий метод

Витратоміри, в яких використано тепловий метод, можуть мати такі принципові схеми:

- калориметричні, засновані на нагріванні (охолоджуванні) потоку палива ДЕ, що розташовано ззовні та створює різницю температур в потоці;
- теплового шару, коли різниця температур створюється з двох сторін потоку палива;
- приграничного шару, коли тепловий вплив зовнішнім ДЕ має місце в приграничних об’ємах палива;
- термоанемометричні (ТАВ), принцип дії яких використовує залежність кількості теплоти, що втрачається тілом, яке розташовано в потоці та постійно нагрівається, від масової ВП.

Схема вимірювання залежить від властивостей палива, зокрема і БП, потрібної точності вимірювання, типу термоперетворювачів, режимів теплового впливу. Для палив з високою в’язкістю переважним можна вважати вимірювання за схемою термоанемометра з підтриманням постійної температури підігріву потоку палива.

Калориметричні витратоміри працюють за принципом виміру температури потоку, яка змінюється внаслідок перенесення тепла рідиною від НЕ до ТП. Тепло, що переноситься, пропорційно швидкості потоку та, відповідно, витраті. Однак окремі автори стверджують, що ТВ краще працюють на малих швидкостях потоку рідини [102].

Існують також калориметричні витратоміри, що використовують принцип перепаду тиску. Перевагою таких

витратомірів є компактність та великий динамічний діапазон виміру витрат. До основних недоліків відносять: залежність показів від різких стрибків температури потоку, а також від різких змін властивостей потоку (густина, теплопровідність тощо).

У калориметричному витратомірі нагрівається (охолоджується) потік рідини окремим елементом, що створює різницю температур в потоці, за якою і визначають витрату (рис. 3.1).

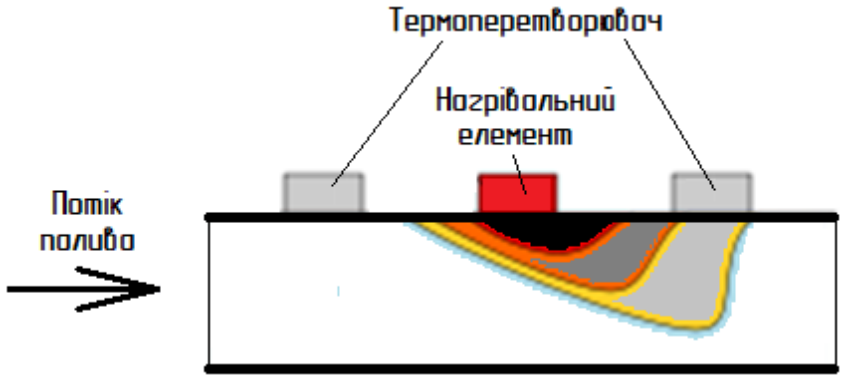


Рисунок 3.1 – Калориметричний витратомір

Авторська розробка.

Якщо не брати до уваги втрати тепла в стінки паливопроводу, тепловий баланс між теплом НЕ і теплом, яке передається потоку, підраховується за формулою:

$$q_t = k_0 Q_M C_P \Delta T, \tag{3.2}$$

де k_0 – поправочний коефіцієнт, що враховує нерівномірність температур в перерізі паливопроводу;

C_p – питома теплоємність (за умови постійного тиску), Дж/(кг·К);

$\Delta T = T_2 - T_1$ – різниця температур, що фіксують датчики (T_1 і T_2 - температури перед НЕ та після нього, К).

В калориметричних витратомірах в більшості випадків використовують електричні НЕ, для яких:

$$q_t = 0{,}24I^2R, \tag{3.3}$$

де I – струм через НЕ, А;

R – опір НЕ, Ом.

Статична характеристика перетворення, що пов’язує різницю температур в потоці з масовою витратою, з урахуванням (3.2) та (3.3), буде мати вигляд:

$$Q_M = \frac{0{,}24I^2R}{k_0C_P\Delta T} \tag{3.4}$$

Принцип дії ТАВ засновано на залежності різниці температур потоку від енергії нагрівання та швидкості потоку в ньому (рис. 3.2). Зокрема, для підвищення точності ВВ додатково вимірюють температуру НС (рис. 3.3) [10].

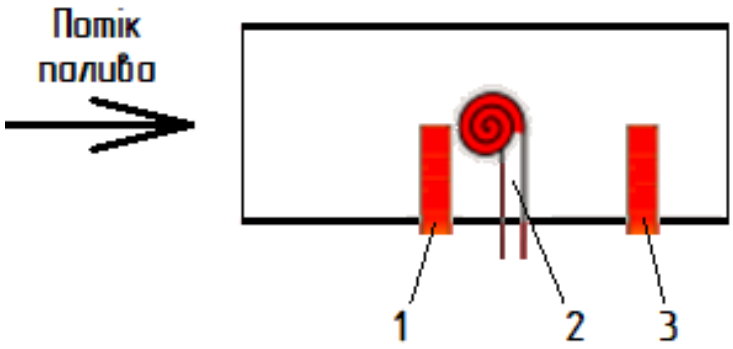


Рисунок 3.2 – ТАВ: 1 – ТП на НЕ; 2 – НЕ; 3 – ТП потоку палива

Авторська розробка.

Робота ТАВ пов’язана з конвективним перенесенням тепла рухомим середовищем від нагрітої поверхні. Енергія на НЕ зазвичай подається постійним струмом з підтриманням постійною його температуру. Швидкість потоку вимірюється перенесенням тепла від НЕ як функція швидкості потоку палива.

ТАВ (рис 3.3) складається з НЕ 1, що розташований в трубці, двох внутрішніх ТП 2 і 3 для отримання значень температур T_1 НЕ 1 і після нього T_2, розташованих на відстані x один від одного, і зовнішнього ТП 4 для вимірювання температури НС. Розподіл температур (рис. 3.3, б).) залежатиме від швидкості руху (витрати) палива.

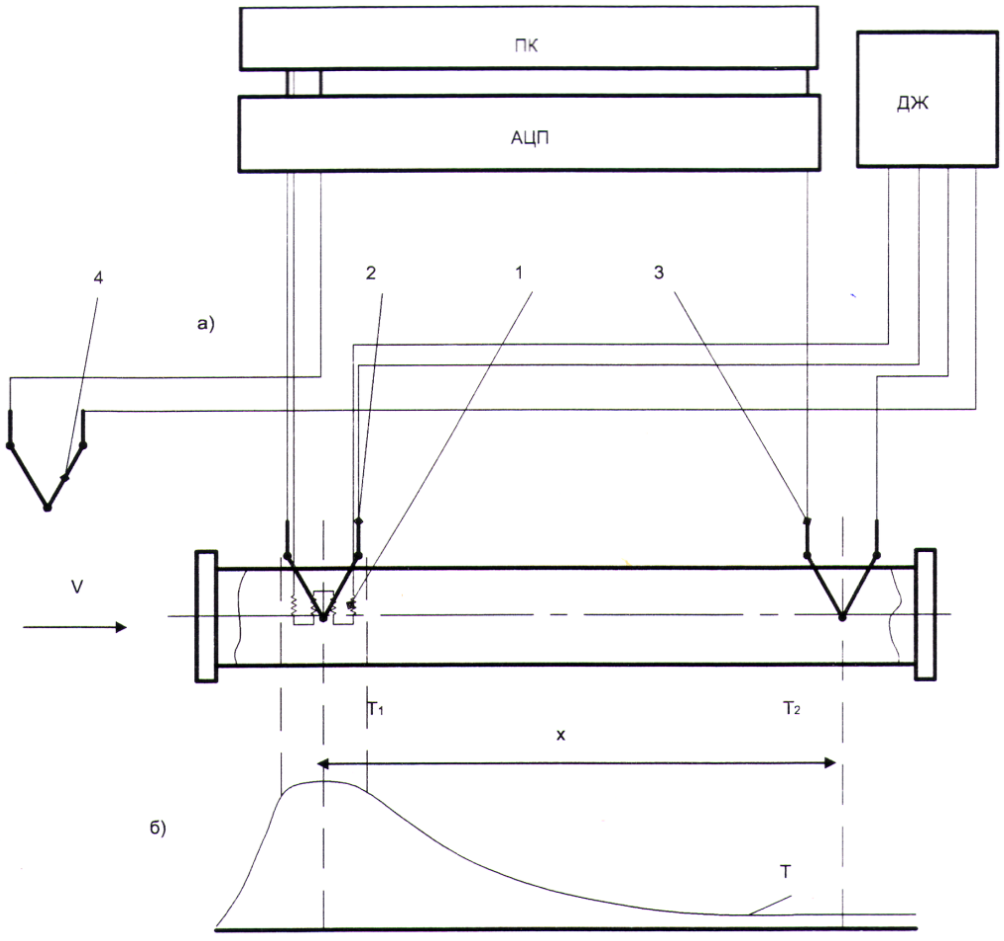


Рисунок 3.3 – Схема ТАВ: а) 1 – НЕ; 2, 3 – ТП для вимірювання температури потоку палива біля НЕ і на відстані x; 4 – ТП для

вимірювання температури НС; б) зміна температури палива за довжиною трубки витратоміра

Авторська розробка.

Рівняння теплового балансу на НЕ можна записати у вигляді [156, 163]:

$$I^2 R_W = h A_W \Delta T, \tag{3.5}$$

де I – струм через НЕ, А;

R_w – опір НЕ, Ом;

h – коефіцієнт теплообміну НЕ;

A_w – площа поверхні НЕ, що омивається паливом, см^2;

ΔT – різниця температур НЕ і середовища, °К.

Оскільки опір НЕ залежить від температури:

$$R_W = R_C[1 + \alpha(T_1 - T_1^C)], \tag{3.6}$$

де α – температурний коефіцієнт опору;

R_C – величина електричного опору за температури калібрування, Ом;

T_1^C – температура калібрування, К.

Коефіцієнт теплообміну h є функцією швидкості потоку V і може бути описаний емпіричною залежністю:

$$h = a + bV^{0,5}, \tag{3.7}$$

де a, b – сталі, що визначаються при калібруванні датчика.

На основі записаних рівнянь можна визначити швидкість потоку (витрату) палива:

$$V = \left(\frac{I^2 R_C \left(1+\alpha\left(T_1 - T_1^C\right)\right)}{A_W \Delta T} \right)^2, \qquad (3.8)$$

Автори [146, 163] зазначають, що перевагами термоанемометричного методу контролю ВП є: досить висока чутливість та задовільна швидкодія, простота його конструктивної реалізації. Це визначає можливість використання цих витратомірів на транспортних ДВЗ. До недоліків ТАВ відносять можливість їх надійної роботи і потрібної достовірності вимірюваних ВП в потоках палив без домішок та з незмінними теплофізичними характеристиками, а також потреба періодичного очищення НЕ від забруднень. Оскільки в усіх системах живлення ДВЗ використовують фільтрацію палива (в деяких системах встановлюється по два паливних фільтри), то воно фактично не має механічних забруднень. Однією з важливих вимог до палив ДВЗ є їх однорідність за ФХВ. Це пов’язано з забезпеченням однаковості організації процесів сумішоутворення і згорання як щодо циліндрів ДВЗ, так і стосовно тактів сталих швидкісних і навантажувальних режимів. Однією з умов забезпечення такої роботи ДВЗ є використання палив з незмінними теплофізичними властивостями. Отже, вказаними недоліками можна знехтувати через встановлені вимоги до палив ДВЗ.

3.2 Класифікація витратомірів та основні вимоги щодо їх використання на автомобільному транспорті

Найбільш повну класифікацію витратомірів рідин наведено на рис. 3.4 [111], однак вона потребує аналізу з погляду можливості їх

використання на транспорті. За даними авторів велику кількість витратомірів можна розглядати за такими основними класифікаційними ознаками: вимірюваною величиною витрат; фізичним явищем, що використано; принципом роботи; особливостями конструкції.

Відповідно до витрат розрізняють об’ємні та масові витратоміри. За явищами, що використано як принцип їх роботи, витратоміри об’єму бувають механічні, механіки рідин, електродинамічні, хвильові.

Масові витратоміри поділяють на механічні та теплові. Зважаючи на принцип роботи витратомірів до об’ємних механічних відносять осцилювальні і тахометричні, до масових механічних – інерційні. За ефектами, що покладені в основу роботи тахометричних витратомірів, виділяють основні групи: мембранні або діафрагмові, кулькові і турбінні [111].

Камерні витратоміри призначені винятково для ВВ у замкнених трубопроводах і лише прозорих рідин. Вони, не зважаючи на переваги, не можуть використовуватися для контролю ВП на АТ, оскільки палива для ДВЗ мають низьку прозорість. Це також стосується БП та сумішевих палив на основі ДП.

Турбінні витратоміри мають в своєму складі крильчатку Вольдмана. Вони реєструють об’єм, що проходить через переріз, використовуючи середню швидкість потоку рідини. Дані витратоміри, як правило, застосовують для виміру відносно великих витрат і в магістралях високого тиску. Лічильний механізм такого витратоміра підраховує імпульси, а недоліком таких витратомірів є велика ПВ потоку, що пульсує [116]. Саме це робить неможливим їх використання на АТЗ, оскільки саме пульсація потоку палива має місце в процесі його нагнітання в систему живлення АТЗ.

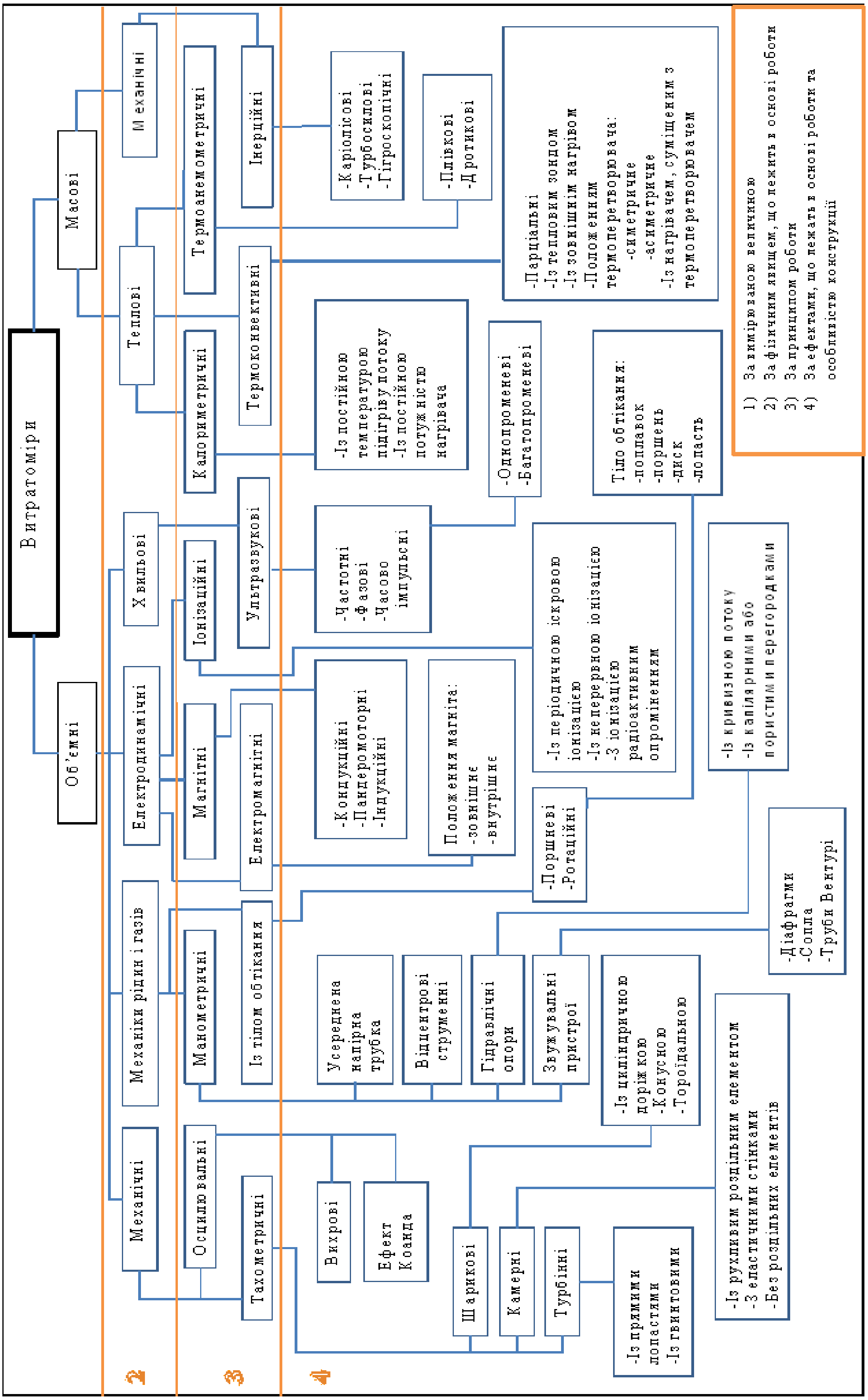


Рисунок 3.4 – Класифікація витратомірів [111]

У вихрових витратомірах використано ефект Кармана, тобто утворення завихорень біля тіла, що обтікається. В деякому діапазоні кількість завихорень пропорційна витраті, а недоліками таких витратомірів є вплив вібрацій на точність вимірювань. Також існує критичність до встановлення (орієнтації в просторі) витратоміра на АТЗ, також, наприклад, потрібно передбачити прямі ділянки до та після витратоміра, що не завжди є конструктивно можливим.

До об’ємних витратомірів механіки рідин належать поршневі та ротаційні. Такі витратоміри мають відносну велику вартість, переважно за рахунок потреби ретельної підгонки роторів, та не здатні працювати з забрудненим паливом [116].

Струменеві витратоміри працюють за принципом створення аеродинамічного генератора автоколивань, тобто подібні до вихорових витратомірів. Вони мають низький поріг чутливості, невелику точність та вузький діапазон ВВ [116], що не відповідає вимогам щодо витратомірів, які використовуються на АТ.

Недоліками витратоміра змінного перепаду тиску є низька точність у процесі вимірювання незначних витрат в магістралях діаметром менше 50 мм. Вони також чутливі до потоків рідин, що пульсують, і це робить неможливим їх використання для транспортних ДВЗ.

Електродинамічні об’ємні витратоміри поділяють на іонізаційні, магнітні та електромагнітні. В іонізаційних витратомірах використано принцип зміни інтенсивності випромінювання, спрямованого перпендикулярно до потоку рідини. Основний їх недолік – вплив тиску та температури на величину іонізації та, відповідно, на ПВ. Якщо вплив температури можна врахувати, то вплив тиску потоку, що пульсує, вносить значну похибку в результати вимірювання.

Основний принцип дії іонізаційних витратомірів – вимірювання інтенсивності випромінювання, що його спрямовують поперек потоку. Зменшення похибки досягається використанням диференційних перетворювачів з двома приймачами іонізаційного потоку. До недоліків витратомірів цього типу належать: складність конструкції, вплив параметрів рідини, тиску і температури на процеси іонізації. Вказані недоліки впливають на ПВ, саме вони обмежують можливість їх використання на АТЗ [119].

Дія магнітно-індуктивних витратомірів ґрунтується на вимірюванні ЕРС, що індукована в потоці електропровідної (під дією зовнішнього магнітного поля) рідини. Ця ЕРС пропорційна витраті, оскільки для замкненого контуру індукована ЕРС пропорційна швидкості зміни магнітного потоку через контур. Однак відомо, що ДП, бензини та БП з ОРП є діелектриками. Винятком є етанол, який внаслідок полярності молекул має властивість проводити електричний струм [36].

Головною перевагою таких витратомірів є те, що первинні перетворювачі не мають частин, які виступають всередину трубопроводу, а спеціальні покриття дозволяють ВВ агресивних і абразійних рідин. Недоліком магнітно-індуктивних витратомірів є поляризація чутливих елементів, що змінює характеристику перетворювача та впливає на ПВ витрат. Також на похибку впливає неоднорідність потоку за фізичними властивостями, турбулентністю та нерівномірністю швидкостей потоку в поперечному перерізі паливопроводу. Ці явища роблять неможливим їх використання на АТЗ [119, 146].

Принцип дії ультразвукових витратомірів полягає в залежності часу розповсюдження ультразвукових коливань через потік палива в трубці заданого діаметра. Він пропорційний швидкості потоку та, відповідно, витраті [156]. Обмеження за мінімальною швидкістю

потоку, складність і вартість витратомірів такого типу, наявність пухирців повітря в паливі, потреба значних прямолінійних ділянок перед витратоміром та після нього роблять неможливим їх використання на АТЗ [146].

Інерційні витратоміри до механічних. На ПВВП за їх допомогою впливають пульсації потоку палива, тряски, вібрації, зміна положення горизонтальної осі автомобіля, встановлення корпусу витратоміра відносно горизонту тощо. Практично в усіх розглянутих витратомірів, які потенційно можуть бути використані для АТЗ, НЖ впливає на ПВВП. В електричній мережі живлення автомобілів напруга може змінюватись в межах 8 … 14,8 В, тому за цією ознакою велика кількість витратомірів потребує додаткових заходів стабілізації НЖ, або вони принципово не можуть бути використані на АТ.

Вище було зазначено, що ТВ поділяються на калориметричні і ТАВ. На них практично не впливають чинники, що наведено для інерційних та багатьох інших витратомірах, тому вони є більш привабливими для використання на АТ.

Сьогодні до засобів контролю ВП висуваються вимоги, повністю задовільнити які складно і практично неможливо. До першої групи належать індивідуальні вимоги: висока точність; надійність; незалежність результатів вимірювання від багатьох ФХВ, густини та інших властивостей палива; швидкодія та значний можливий діапазон вимірювання.

До іншої групи вимоги, які характеризують всю групу витратомірів для АТЗ. Витратоміри мають надавати можливість:

- вимірювання різноманітної номенклатури палив з різними властивостями;
- ВВ різних значень витрат при різних тисках та температурах.

ТАВ можуть застосовуватися для вимірювання та контролю невеликих витрат різних рідин при різних температурах, оскільки принцип їх дії заснований на використанні теплової дії на потік речовини залежно від масової її витрати. Оскільки на результати вимірювання не впливає більшість негативних умов роботи АТЗ, вказані витратоміри вважаються найбільш перспективними для вимірювання і КВБ. Також важливими є вплив на точність ВВ фізичних властивостей палив, зовнішньої температури та теплопровідності стінок ТАВ.

Можливості ТАВ розширюються використанням нестаціонарних режимів підведення тепла з подальшою реєстрацією характеристик теплообміну, тобто – з ВП. Всі теплові методи вимірювання ВП, одночасно з забезпеченням метрологічних характеристик. використовують вихідний сигнал частотно-годинної форми, а це дає додаткові переваги та можливість обробляти отриману інформацію засобами МП техніки, зокрема з НП.

Використання сучасної МП техніки додає термоанемометричному методу вимірювання і контролю ВП такі переваги:

- підвищена динамічна властивість, яка не пов’язана з об’єктом контролю;
- широкий діапазон значень витрат;
- можливість отримання та обробки частотного вихідного сигналу;
- можливість в реальному часі компенсації різних похибок комплексною обробкою сигналу;
- відсутність рухомих частин що дає потенційно високу надійність в умовах динамічних навантажень, трясіння, ударів, вібрацій тощо.

Отже, ТАВ можна вважати перспективними для використання в умовах експлуатації транспортних машин, автомобілів, дорожньої

техніки тощо, які використовують рідке моторне паливо як дизельне або бензинове, так і з різними біодомішками.

3.3 Вибір принципу дії, конструкції витратоміра біопалив та формулювання вимог до нього

Контроль ВП є важливою складовою сучасних технологій енергозбереження на АТ. Такий контроль має проводитись в процесі розробки, експлуатації АТЗ, обґрунтування норм ВП тощо. Впровадження вказаних технологій пов’язано зі специфічними вимогами до засобів вимірювання та вимагає підвищення швидкодії і точності вимірювань, зменшення і/або унеможливлення похибок.

В роботі [14] зосереджується увага на відомих конструкціях і технічних характеристиках деяких витратомірів. Однак повного узагальненого порівняльного аналізу характеристик витратомірів різних конструкцій та принципу дії для використання їх на АТ на сьогодні немає.

Існуючі витратоміри поділяються на такі великі групи [156]:

- що базуються на різних гідродинамічних методах (парціальні, вихрові, перепаду тиску, змінного рівня, обтікання);
- що базуються на різних фізичних явищах (теплові, іонізаційні, електромагнітні, ультразвукові, акустичні, оптичні, магнітні);
- що базуються на особливих методах (міткові, концентраційні, кореляційні);
- з рухомим тілом (камерні, силові, тахометричні).

Дія витратомірів перепаду тиску полягає у вимірюванні тисків при протіканні рідини через пристрій звуження. В результаті збільшення швидкості руху палива статичний тиск потоку після звужувального пристрою зменшується, а різниця тисків залежить від величини ВП.

Витратомір змінного рівня працює на основі залежності між ВП та висотою його рівня в посуді, водночас паливо постійно надходить і витікає через отвори певних діаметрів.

Чутливий елемент витратоміра обтікання переміщується під дією динамічного тиску потоку. Такі витратоміри поділяються на: витратоміри постійного перепаду тиску; зі змінним перепадом тиску, з поворотною лопаттю.

В вихрових витратомірах витрата залежить від частоти зміни тиску. Коливання тиску виникають в потоці в процесі коливання потоку палива.

В парціальних витратомірах витрата визначається через частку основного потоку в трубці, що під'єднана паралельно основному паливопроводу. Такі витратоміри можна поділяють на групи з:

- незворотним відгалуженим потоком;
- повертанням відгалуженого потоку в основний;
- утворенням парціального потоку з допоміжною речовиною.

Конструкція тахометричних витратомірів містить рухомий елемент. Швидкість руху такого елемента пропорційна ВП. Тахометричні витратоміри бувають: кулькові, турбінні, камерні та роторно-кулькові.

Силові витратоміри працюють за принципом залежності силового впливу від масової витрати. Прискорення, що утворюється за надання потоку додаткового руху, пропорційне масовій ВП. Вимірюваний параметр, як правило, – це потужність на закручування потоку, пропорційний витраті. Тому такі витратоміри вимірюють масову витрату.

Тахометричні витратоміри камерного типу мають рухливі елементи, що приводяться в рух під тиском палива, водночас відраховують одиничні маси або об'єми.

ТВ працює за принципом вимірювання теплового впливу на потік або тіло, що контактує з потоком. За характером взаємодії з потоком вони поділяються на:

- калориметричні (при електричному нагріванні НЕ розташований усередині);
- термоконвекторні (НЕ зовні труби);
- ТАВ.

В основу роботи електромагнітного витратоміра покладено взаємодію магнітного поля з рухомою електропровідною рідиною. Такі витратоміри неможливо застосовувати для АТЗ, оскільки нафтові палива є діелектриками. Але, з електромагнітним полем можуть взаємодіяти деякі домішки до основного палива, наприклад, БЕ.

Дія акустичних витратомірів пов’язана з вимірюванням параметрів процесу проходження акустичних коливань через потік палива, на які впливає його витрата. Як правило, використовують коливання в ультразвуковому діапазоні частот, тому їх також називають ультразвуковими. Використовують ефект переміщення акустичних коливань рухомим середовищем, або ефект Допплера.

Оптичні витратоміри використовують явище зміни оптичних ефектів від ВП в потоці.

Кореляційні витратоміри запам’ятовують в обраному перерізі паливопроводу образ потоку та здійснюють його подальше розпізнавання в наступному перерізі, який розташований на відстані. На основі порівняння двох образів робиться висновок про параметри руху середовища.

Концентраційні витратоміри використовують залежність кратності розведення спеціальної речовини, що вводиться в потік, від витрати [156].

Якщо врахувати основні властивості палив ДВЗ (табл. А.1, додаток А) та умови роботи АТЗ, можна попередньо сформулювати

переваги та недоліки витратомірів різних типів з погляду їх можливого використання на АТЗ. Відразу можна зауважити, що витратоміри, які конструктивно не придатні для використання на АТ, мають низьку точність ВВ і не беруться до уваги. Наприклад, на роботу витратомірів змінного рівня впливають коливання, силові та витратоміри обтікання мають рухомі частини, що знижує точність ВВ під час руху АТЗ до ± 4% тощо.

Порівняння та аналіз методів і засобів вимірювання ВП, а також основні властивості витратомірів (табл. В.1, В.2, додаток В) дозволяють виділити їх особливості з погляду використання на АТЗ та сформулювати основні вимоги до них:

1. Висока точність вимірювання. Для визначення і контролю ВП на АТ, особливо для наукових досліджень, нерідко потрібно мати відносну ПВВП в межах 0,2–0,5%. Підвищення точності можливе застосуванням як відомих методів і засобів, так і вдосконаленням відомих класичних через пристосування їх до умов роботи АТЗ;

2. Задовільна надійність. Витратоміри, що використовуються на АТЗ, відрізняються за своєю конструкцією від приладів, які встановлюються стаціонарно. На них впливають: вібрація, яка може досягати 0,5–2 g, сили інерції, що виникають в процесі руху АТЗ. На витратоміри, що розташовують поряд з двигуном, може діяти вібрація до 15 g.

В експлуатації витратоміри працюють за температур середовища -60 … +60 °С, а залежно від місця їх розташування температура може досягати значень 120 °С. На витратоміри потрапляє бруд, пил, сконденсована волога та вода, паливо, масло, солі, грибки та комахи.

Витратоміри живляться постійним електричним струмом бортової мережі АТЗ. Вони мають бути нечутливими до коливань напруги в широких межах, а також до її пульсацій.

АТЗ працюють у місцевостях на різних висотах над рівнем моря, і витратоміри палива також мають бути здатними працювати за зміни атмосферного тиску в межах 650 … 800 мм. рт. ст. Для надійної роботи витратомірів важливою є додаткова фільтрація палив;

3. Незалежність результатів вимірювання від зміни властивостей палива. Необхідність автоматичної корекції результатів вимірювання за зміни, наприклад, густини палива, особливо щодо залежності від його температури (тиску);

4. Швидкодія. Швидкодію більшості витратомірів оцінюють значенням постійної часу Т, протягом якого його покази за стрибкоподібної зміни витрати від Q_1 до Q_2 змінюються, орієнтовно, на 2/3 від $Q_2 – Q_1$. Так, турбінні витратоміри мають постійну часу Т в межах тисячних часток секунди. В ТАВ час Т вимірюється десятками секунд, що потребує додаткових технічних рішень в разі їх використання на АТЗ;

5. Відносно великий діапазон вимірювання (Q_{max}/Q_{min}). За використання витратомірів на АТЗ значення ВП можуть змінюватися в широких межах. В ТАВ можна одержати шкалу з великим діапазоном вимірювання зміною потужності НЕ;

6. Однакова чутливість у всьому діапазоні вимірюваних ВП. Чутливість витратоміра – важлива його властивість, особливо за роботи в широких діапазонах змінних ВП. Чутливість в кінцевому підсумку впливає на точність вимірювання, тому бажано її мати однаковою і стабільною в усьому діапазоні вимірювання. Для цього потрібно запропонувати технічні рішення щодо вдосконалення витратомірів палив, наприклад, використанням сучасних МП засобів з автоматичною корекцією витрат в різних діапазонах їх вимірювання;

7. Номенклатура палив, зокрема і багатокомпонентних. Основні методи вимірювання ВП орієнтовані на однокомпонентні палива, або на палива з незмінними компонентами. Домішки в БП можуть мати

різні ФХВ, концентрація яких також впливає на властивості палива в цілому, тому треба враховувати як основні властивості (тиск, температура тощо), так і особливі (абразивність, агресивність, вибухонебезпечність, токсичність, електропровідність, гігроскопічність тощо).

Аналіз показує, що ТАВ за багатьма властивостями є привабливими для використання на АТЗ, але вони потребують удосконалення (підвищення точності, швидкодії, розширення діапазону вимірювань та номенклатури палив тощо).

3.4 Математична модель теплових потоків термоанемометричного витратоміра біопалив

ТАВ можуть застосовуватися при вимірюваннях невеликих витрат практично будь-яких рідин з різними фізичними властивостями. Для визначення витрати БП потрібно враховувати вплив концентрації домішок до основного палива на ПВ, наприклад, внаслідок їх впливу на теплопровідність палива в цілому.

3.4.1 Моделювання часу виходу термоанемометричного витратоміра на робочий режим

Робота ТАВ має починатись з виходу на потрібний температурний режим. Це пов’язано з необхідністю передачі тепла від НЕ паливу, прогріву палива і подальшим перенесенням тепла в радіальному та осьовому напрямках.

Експериментально встановлено, що час виходу ТАВ на РТР для заданих струмів через НЕ (як правило, це нагрівальний ніхромовий елемент) та різних ОК РО в ДП змінюється в діапазоні 1,75; …; 7,4 сек, а для ДП – 3,7; …; 16,2 сек за умови безпеки щодо самоспалахування палива (рис. 3.5) [10, 15]. Аналогічну картину слід

очікувати і для інших БП з різною концентрацією БС в паливі, що в кожному конкретному випадку може бути визначено експериментально. Отже, час виходу ТАВ на РТР залежить від ОК РО в ДП та змінюється в декілька разів. Цей факт потрібно враховувати в алгоритмі роботи ТАВ.

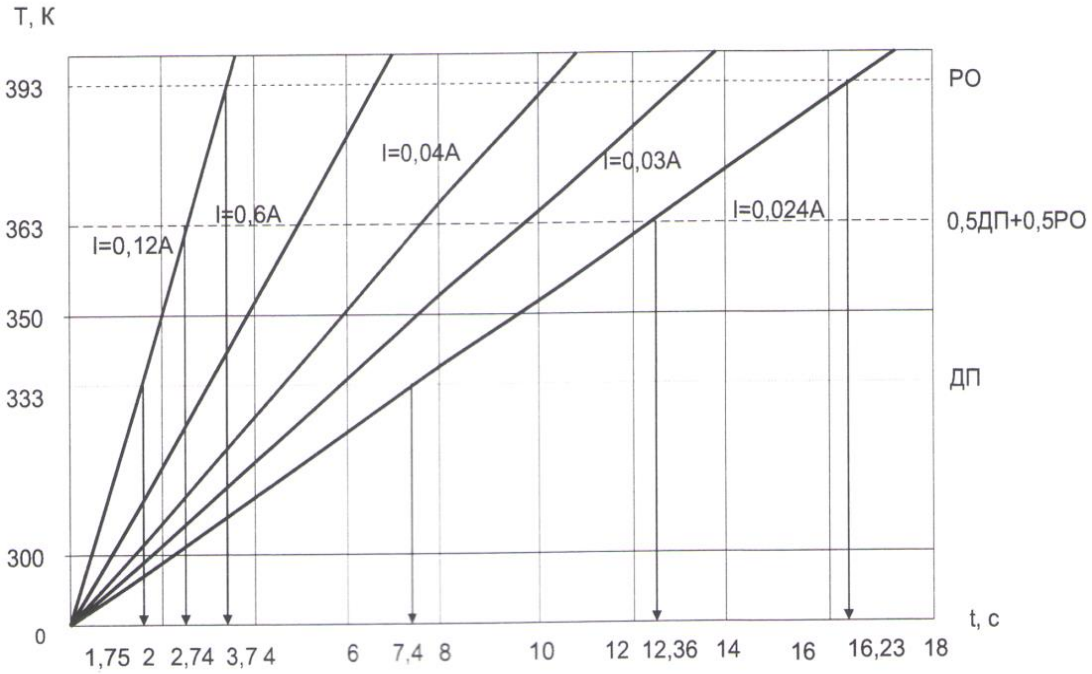


Рисунок 3.5 – Час виходу ТАВ на РТР від струму через НЕ для БП з домішками РО

Авторська розробка.

З рис. 3.5 видно, що концентрація РО суттєво впливає на час виходу ТАВ на РТР, імовірно внаслідок зміни теплопровідності БП.

ФХВ ДП та БП суттєво відрізняються, що, безумовно, потребує врахування в алгоритмах роботи ТАВ. Сьогодні актуальним стає використання суміші ДП та ОРП, БД, бензину з домішками БЕ. Але застосування ОРП в БД ускладнено більш високою їх густиною, в’язкістю, іншою теплопровідністю порівняно з ДП.

В алгоритмі роботи ТАВ спочатку потрібно аналізувати температуру спалахування палив, яка є найменшою температурою, за

якою за наявних температур над поверхнею БП утворюється суміш з повітрям, яка здатна спалахувати від впливу зовнішнього джерела. Така ППС не обов'язково стійко горить, процес обмежений швидкістю її утворення. Відомо, що температура спалахування палива тим вища, чим вища температура кипіння. Фракції бензину мають температуру спалахування до -40 °С, масла спалахують в більш широкому діапазоні температур від 130 … 350 °С. Температура спалахування – це таке її значення, за якого починається процес горіння. Відповідні державні стандарти для палив встановлюють температуру спалахування 61 °С, нижче за значень якої їх відносять до легкозаймистих речовин, а вище за значень – до горючих.

Поява ППС, що здатна спалахувати в ТАВ, практично неможлива, оскільки повітря відсутнє, в каналах системи живлення ДВЗ паливо знаходиться завжди під тиском. До уваги, можна приймати температури кипіння палива або спалахування в закритому тиглі. Для ДП температура кипіння знаходиться в межах 170 … 380 ℃ (для нормальних атмосферних умов), тому, з погляду безпеки процесу КВБ, можна обирати максимальне значення температури ДП в ТАВ саме до 170 ℃. Для БД ця температура дорівнює 150 ℃, що треба враховувати в процесі його нагрівання.

Температуру нагріву БП в ТАВ можна отримати з урахуванням його питомої теплоємності, кількості підведеної теплоти та маси БП. Кількість теплоти, потрібної для нагрівання БП, Дж, обчислюють за формулою:

$$Q_{\text{П}} = C_m m(T_2 - T_1) = C_m V \rho (T_2 - T_1), \qquad (3.9)$$

де c_m – питома теплоємність, Дж/кг·°С;

m – маса, кг

T_2 – температура нагріву, °С;

T_1 – початкова температура, °С;

V – об’єм БП біля НЕ, м^3;

ρ – густина БП, кг/м^3.

Кількість теплоти, що утворює електричний НЕ, Дж:

$$Q_H = I^2 R \Delta t, \tag{3.10}$$

де I – струм через НЕ, А;

R – опір НЕ, Ом;

Δt – час проходження струму через НЕ (час виходу виратоміра на РТР), сек.

На об’єм БП біля НЕ впливають геометричні параметри і ДТ витратоміра. Він розраховується за конкретними значеннями конструктивних параметрів ТАВ.

Відповідно до закону збереження енергії та, нехтуючи втратами тепла, за (3.9), (3.10) час нагрівання БП до необхідної температури, сек визначається:

$$\Delta t = \frac{C_m V \rho (T_2 - T_1)}{I^2 R} \tag{3.11}$$

Питома теплоємність різних палив змінюється в широких межах, а найбільш розповсюджені палива для АТЗ з ДВЗ мають значення c_m = 1400 … 2500 Дж/кг°С.

На початку роботи витратоміра для зменшення похибки КВБ нагріти БП до температури T_2 = 170 °С. Початкова температура T_1 приймається залежно від температурних умов експлуатації АТЗ. Наприклад, для автомобіля КрАЗ-6510-030 прийнятий в експлуатації

діапазон -45 … +50 °С, тому T_2 - T_1 для наведених значень температур перебуватиме в діапазоні +120 … +215 °С. А за дуже низьких температур експлуатації АТЗ потрібно враховувати температуру застигання палив, що, перш за все, стосується ДП та сумішевих на їх основі. Для збільшення температурного діапазону використання БП використовують депресори – домішки з високою поверхневою активністю, щоб затримати процес появи кристалів парафіну.

НЕ частіше виконують з ніхромового дроту, зі значенням питомого опору 1–1,1 Ом·мм^2/м. В розробленому макетному зразку ТАВ НЕ виконано спіральної форми з дроту ніхрому Х20Н80 з питомим опором 5,61 Ом/м, діаметром 0,5 мм та довжиною 130 мм. НЕ має електричний опір 0,7293 Ом, струм в ньому дорівнює 16,45 А для електричної мережі АТЗ 12 В або 32,9 А – для мережі 24 В. Неважко отримати час виходу ТАВ на РТР, що характеризується підвищенням температури БП, яке знаходиться у внутрішньому об’ємі трубки ТАВ за довжиною НЕ. Наприклад, для трубки витратоміра діаметром 0,02 м, довжині дроту НЕ 0,025 м об’єм БП, що нагрівається по довжині спиралі НЕ, дорівнює $7{,}85 \cdot 10^{-6}$ м^3. Якщо прийняти густину БП 900 кг/м^3 його маса, що нагрівається, дорівнюватиме $7{,}065 \cdot 10^{-3}$ кг. Тоді з (3.11) час виходу витратоміра на потрібний температурний режим з трубкою вищенаведених геометричних параметрів, за умов температури НС -45 °С, складе 15 сек.

Очевидно, що у разі зменшення температури НС та струму через НЕ і збільшення ДТ час виходу витратоміра на РТР буде більшим, що впливає на ПВ витрат БП. Отже, потрібним є попередній підігрів БП, наприклад, безпосередньо перед витратоміром, в бакові АТЗ тощо та враховувати вказаний час в алгоритмі його роботи.

Розрахунки показують, що для живлення ТАВ напругою 12 В, внутрішнім діаметром 0,01 … 0,08 м трубки ТАВ, спіраллю НЕ з

ніхрому Х20Н80 (діаметр 0,5 мм та довжина дроту 13 см) розміром за довжиною спіралі 0,025 м, для БП з питомою теплоємністю 1500 … 2500 Дж/кг°С час виходу витратоміра на робочий температурний режим графічно виглядатиме так, як показано на рис. 3.6.

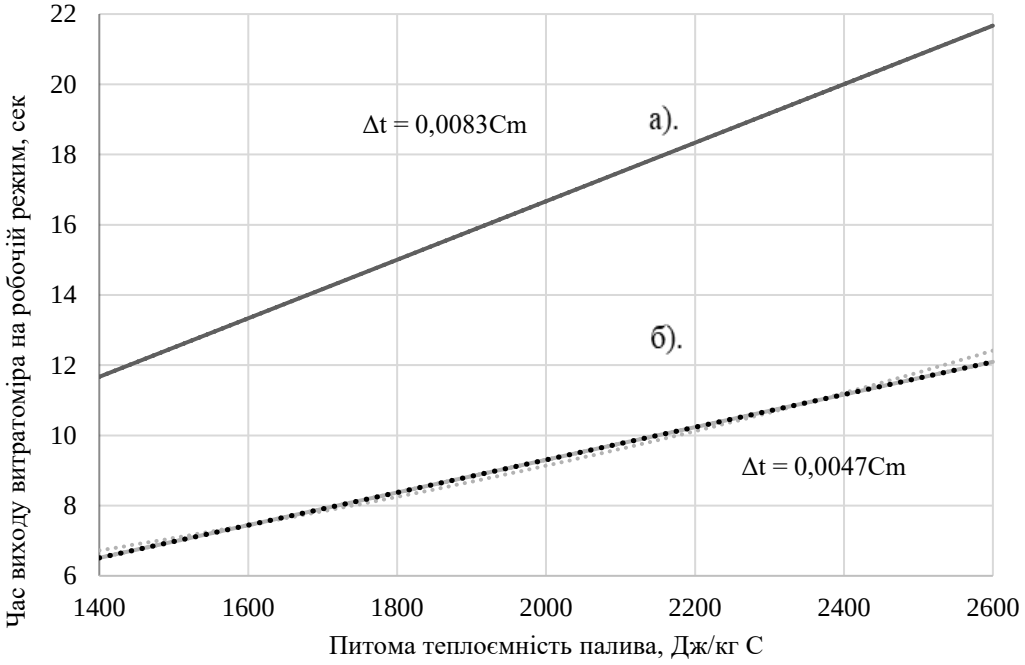


Рисунок 3.6 – Час виходу ТАВ на РТР (НЕ Х20Н80; опір НЕ 0,7293 Ом; об’єм палива, що нагрівається, $7{,}85 \cdot 10^{-6}$ м^3 в діапазоні температур -45 … +170 °С): а). – НЖ 12 В; б). – НЖ 24 В

Авторська розробка.

Аналіз рис. 3.6 доводить, що час виходу витратоміра з прийнятими параметрами трубки та НЕ на РТР залежить від початкової температури, властивостей БП та струму через НЕ. Для зменшення сумарної ПВ витрати БП це потрібно враховувати на початку роботи ТАВ. Для НЖ від 12 до 24 В вказаний час визначають інтерполяцією. Можна також запропонувати вимірювання

температури біля НЕ. Потрібно також враховувати наявність РТП в трубці ТАВ, витрати тепла в стінку трубки, які знижують температуру біля НЕ, впливають на її розподіл в осьовому напрямку, що, в підсумку, впливає на ПВ витрат БП. Отже, конструкція ТАВ та алгоритм його роботи мають передбачати контроль температури в зоні НЕ та підтримку її необхідного значення. РТП ТАВ спрямований від НЕ до стінки трубки, це пояснюється тим, що температура в зоні НЕ завжди вища за температуру трубки. Для підтримки певного значення температури в зоні НЕ за різних змінних витрат БП її потрібно контролювати та змінювати кількість тепла, що його віддає НЕ. Для рідких БП температуру палива в зоні НЕ можна прийняти 170 °С. Для БП, що досліджуються, та прийнятих конструктивних параметрів витратоміра на початку його роботи потрібно враховувати час виходу ТАВ на РТР протягом 6 сек (рис. 3.6), для визначення мінімального вказаного часу потрібно враховувати температуру НС, вид БП та конструктивні параметри ТАВ.

Оскільки точність ВВ БП за допомогою ТАВ пов’язана з теплопровідністю як самого БП, так і стінок трубки ТАВ, виникає потреба враховувати зміну РТП в ТАВ.

3.4.2 Моделювання радіального теплового потоку в трубці термоанемоментричного витратоміра

Зміну РТП в ТАВ можна проаналізувати на прикладі двокомпонентного палива на основі ДП. Як домішки можуть використовуватися різні ОРП та їх метилові або етилові ефіри (рис. 3.7).

Для двокомпонентного палива коефіцієнт теплопровідності можна подати, Вт/(м К) у вигляді:

$$\lambda_1 = \lambda_{ОСН}(1-k) + \lambda_Д k, \qquad (3.9)$$

де $\lambda_{ОСН}$ – коефіцієнт теплопровідності основного палива, Вт/(м·К);

$\lambda_Д$ – коефіцієнт теплопровідності домішки, Вт/(м·К);

k – ОК домішки, k = 0…1.

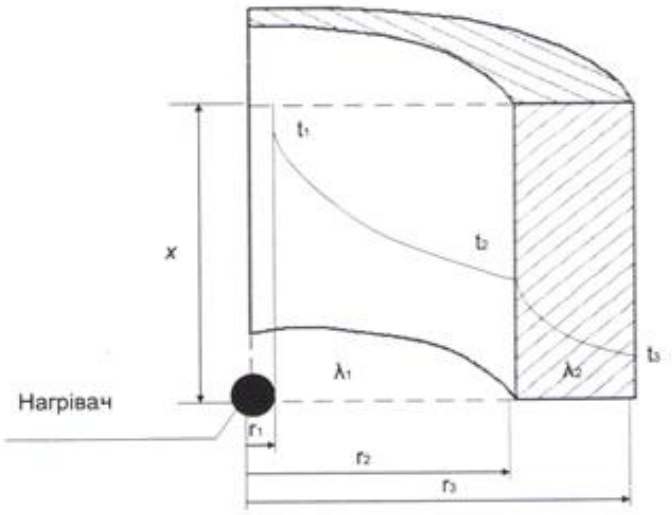


Рисунок 3.7 – Схема зміни РТП в трубці ТАВ: t_1, t_2, t_3 – температури на радіусах r_1, r_2, r_3, відповідно

Авторська розробка.

Тоді, лінійна густина РТП в циліндричній трубці витратоміра визначається [15], Вт/м за формулою:

$$q_1 = \frac{2\pi(t_1 - t_3)}{\frac{ln\frac{d_2}{d_1}}{\lambda_1} + \frac{ln\frac{d_3}{d_2}}{\lambda_2}}, \quad (3.10)$$

де t_1 – температура НЕ (температура на осі трубки витратоміра), К;

t_3 – температура зовнішньої поверхні трубки, К;

d_1, d_2, d_3 – діаметр НЕ, внутрішній та зовнішній ДТ ТАВ, м;

λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопровідності палива та стінки трубки ТАВ, Вт/(м·К).

На основі формул (3.9), (3.10) стає можливим врахувати зміну РТП в трубці ТАВ при використанні БП. Шляхом перетворень (3.10) можна привести до вигляду:

$$q_1 = \frac{2\pi}{ln\frac{d_3}{d_1}} \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1} (t_1 - t_3) \tag{3.11}$$

Оскільки у першому дробові (3.11) знаходяться тільки конструктивні параметри трубки ТАВ (зовнішній ДТ d_3 та діаметр НЕ d_1), його пропонується назвати конструктивним коефіцієнтом трубки ТАВ:

$$K_K = \frac{2\pi}{ln\frac{d_3}{d_1}} \tag{3.12}$$

Товщина стінки трубки набагато менша за її внутрішній діаметр, тому можна прийняти, що $d_3 \approx d_2$, і в подальших розрахунках використовувати d_2 як зовнішній ДТ ТАВ. З (3.12) слідує, що РТП q_1 не залежить від конструктивних параметрів трубки ТАВ, якщо:

$$ln\frac{d_3}{d_1} \approx ln\frac{d_2}{d_1} = 2\pi, \tag{3.13}$$

або відношення зовнішнього ДТ ТАВ до діаметра НЕ

$$\frac{d_2}{d_1} = e^{2\pi} \approx 534 \tag{3.14}$$

З конструктивних міркувань забезпечити відношення ДТ ТАВ до діаметра НЕ, що дорівнює 534, не є зручним для використання на АТЗ. Графічне зображення залежності (3.12) наведено на рис. 3.8.

Зазначимо, що параметри РТП ТАВ (лінійна густина теплового потоку) не залежать від товщини стінки трубки, вони також змінюються зі зміною відношення зовнішнього ДТ ТАВ до діаметра НЕ.

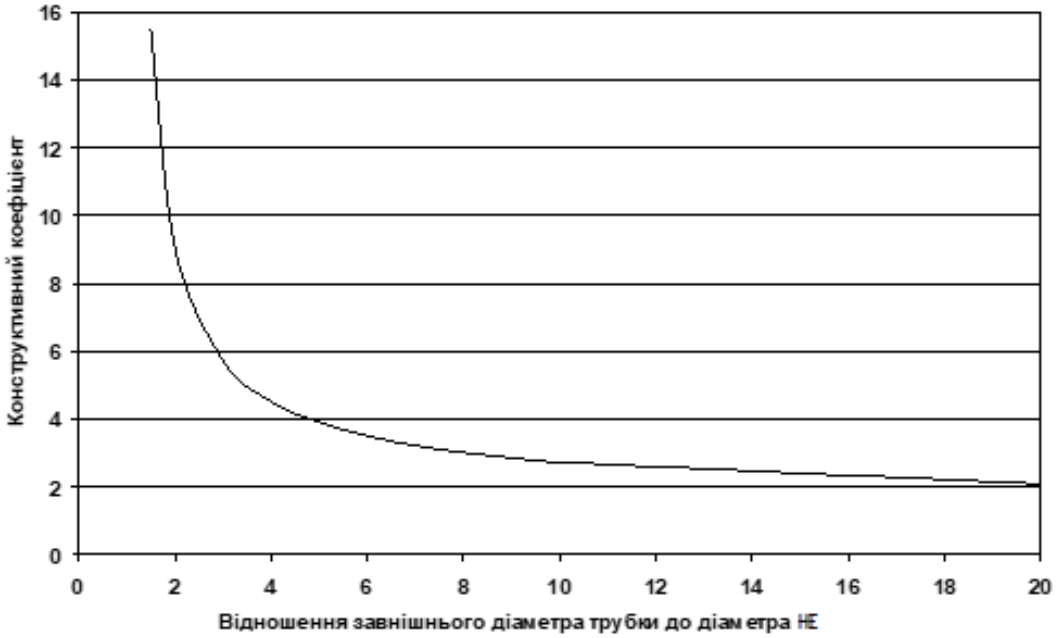


Рисунок 3.8 – Залежність конструктивного коефіцієнта трубки ТАВ від відношення зовнішнього ДТ до діаметра НЕ

Авторська розробка.

3.4.3 Передача тепла в термоанемометричному витратомірі залежно від деяких його конструктивних параметрів

Вимірювання різних параметрів палив застосовують у багатьох галузях: нафтовидобуванні, машинобудуванні, сільському господарстві, на транспорті тощо. Параметрами руху потоку палив є їх кількість, що протікає через відомий переріз за одиницю часу та загальна кількість перенесеного палива (витрата).

В ТАВ аналізують передачу тепла, яка має місце в осьовому напрямку (рис. 3.9). Але така передача існує не тільки в осьовому напряку, але й у радіальному, які є взаємовпливовими та

взаємопо’язаними. Для визначення параметрів руху палива аналізують розподіл температур вздовж осі трубки витратоміра.

Як було доведено вище, РТП ТАВ з циліндричною стінкою суттєво зменшується наближенням конструктивного коефіцієнта трубки витратоміра до одиниці, тобто зі збільшенням відношення зовнішнього ДТ витратоміра до діаметра НЕ. Отже, для зменшення впливу параметрів РТП на параметри ОТП потрібно зменшувати діаметр НЕ та збільшувати ДТ ТАВ. Причому, згідно з (3.14), відношення діаметрів не бажано вибирати більшим за 534, тому що його подальше зростання вказаного відношення призведе до значень конструктивного коефіцієнта менших за одиницю та, відповідно, до зростання впливу РТП на ОТП, тобто на ПВВП. Як рішення можна запропонувати використання якомога тоншого дротового НЕ, що розташований вздовж осі трубки ТАВ.

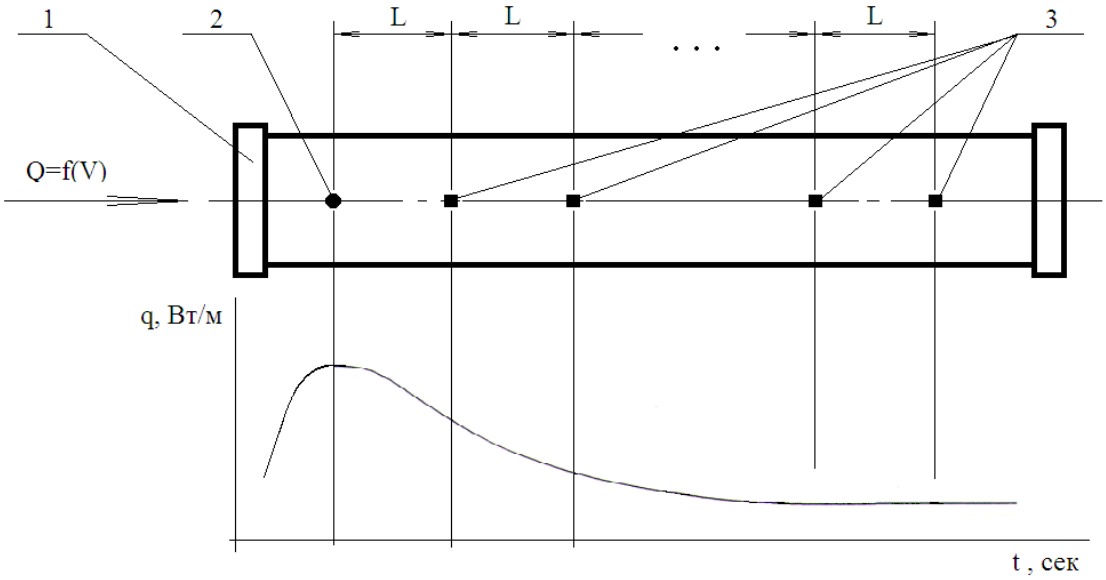


Рисунок 3.9 – Схема передачі тепла в осьовому напрямку ТАВ: 1 – трубка; 2 – НЕ; 3 – ТП; Q – ВП, мм^3/с; V – швидкість потоку палива, м/с; L – відстань між НЕ, м; q – тепловий потік, Вт/м.

Авторська розробка.

В (3.11) другий дріб характеризує теплопровідність ТАВ в радіальному напрямку і його запропоновано називати коефіцієнтом РТ трубки ТАВ [16, 25]:

$$K_{PT} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1} \tag{3.15}$$

Як видно з (3.15) на величину K_{pT} має більший вплив теплопровідність матеріалу трубки ТАВ, оскільки її величина може різнитися залежно від теплопровідності матеріалу трубки на декілька порядків. Середнє значення теплопровідності палив дорівнює 0,11 Вт/(м·К). Наприклад, для трубки з ебоніту (0,16 Вт/(м·К)) коефіцієнт РТ трубки ТАВ K_{pT} дорівнює 0,0652, аналогічно для трубки з монелі (14,9 Вт/(м·К)), коефіцієнт РТ трубки ТАВ K_{pT} збільшиться до 0,1092. Сплав металів 95 % Al + 3-5 % Cu + 0,5 % Mg в якості матеріалу трубки ТАВ з ще більшим значенням теплопровідності (181 Вт/(м·К)) дає незначне збільшення коефіцієнта РТ трубки ТАВ K_{pT} до 0,1099.

З урахуванням вказаних значень K_{pT}, взявши до уваги існуючі найбільш розповсюджені матеріали, що можуть бути використані для виготовлення трубки ТАВ для вимірювання ВП ДВЗ, можна встановити, що для найменшого впливу РТП на осьовий, і тим самим на ПВ витрат БП, має виконуватись умова:

$$\frac{d_2}{d_1} = 22{,}46 \ldots 67{,}62 \tag{3.16}$$

Для повного усунення впливу теплопровідності матеріалу трубки ТАВ на РТП, потрібно знайти таке значення коефіцієнта теплопровідності матеріалу трубки, за якого коефіцієнт її РТ K_{pT} дорівнює одиниці. Розрахунки показують, що матеріалів з такими властивостями не існує, тобто, реалізація цієї тези можлива тільки

теоретично, і повне усунення впливу РТП на ОТП в трубці ТАВ за рахунок вибору матеріалу трубки неможливе.

Усунути спільний вплив коефіцієнтів $K_к$ і $K_{рт}$ на РТП для вимірювання ВП можна, прирівнявши їх добуток до одиниці. З урахуванням (3.11):

$$\frac{2\pi}{ln\frac{d_2}{d_1}}\frac{\lambda_2\lambda_1}{\lambda_2+\lambda_1}=1 \qquad (3.17)$$

З (3.17) можна встановити найкраще відношення ДТ ТАВ до діаметра НЕ за умови найменшого їх впливу та впливу теплопровідності трубки на РТП (ПВ витрат) БП. Результати розрахунків для деяких матеріалів трубки витратоміра наведено в табл. 3.1.

Як було показано вище, РТП в трубці ТАВ залежить від добутку конструктивного коефіцієнта, коефіцієнта РТ трубки і різниці температур НЕ та зовнішньої поверхні трубки витратоміра.

Для зменшення впливу РТП на ОТП (на ПВ витрат) необхідно обирати такі матеріал трубки ТАВ, її діаметр та діаметр НЕ, щоб відношення вказаних діаметрів відповідало матеріалу трубки ТАВ (рис. 3.5.).

Аналіз рис. 3.10 показує, що d_2/d_1 для матеріалів з коефіцієнтом теплопровідності 0,16 … 12 Вт/(м·К) має мати значення в межах 0,507 … 1,984, що призведе до зменшення впливу РТП на осьовий тепловий потік і, в підсумку, на зменшення ПВВП. Відповідно до значень коефіцієнтів теплопровідності матеріалу трубки витратоміра відношення d_2/d_1 має визначатись за встановленими залежностями (табл. 3.2).

Таблиця 3.1 – Вибір геометричних параметрів та матеріалу трубки ТАВ

Матеріал трубки витратоміра	Теплопровідність, Вт/(м·К)	d_2/d_1
Ебоніт	0,16	1,507
Фторопласт Ф-5	0,25	1,62
Гіпотетичні матеріали (з припустимою теплопровідністю)	2	1,92
	6	1,97
	10	1,98
	12	1,984
Монель	14,9	1,99
Гіпотетичні матеріали (з припустимою теплопровідністю)	50	1,99
	100	1,99
95% Al + 3-5% Cu + 0,5% Mg	181	1,99
Гіпотетичні матеріали (з припустимою теплопровідністю)	250	1,99
	300	1,99

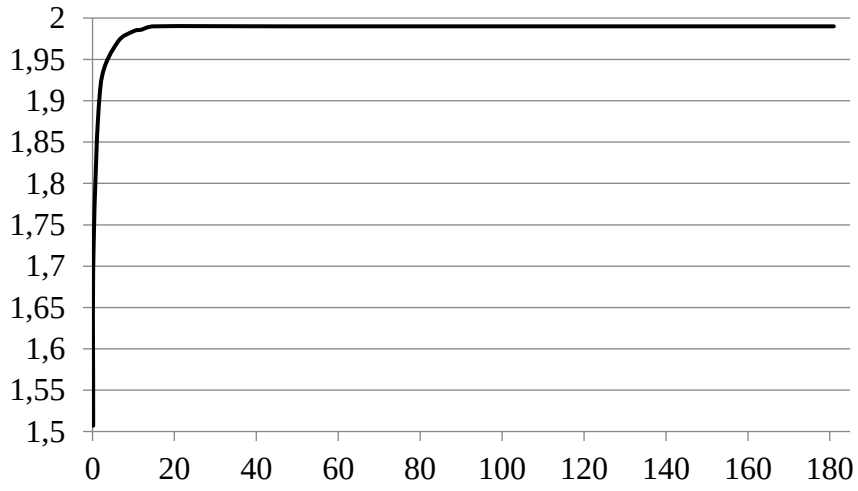


Рисунок 3.10 – Залежність d_2/d_1 (відношення ДТ витратоміра до діаметра НЕ) від коефіцієнта теплопровідності різних матеріалів за умови найменшого впливу на РТП

Авторська розробка.

Таблиця 3.2 – Залежності зміни d_2/d_1 від теплопровідності матеріалу трубки ТАВ (за умови зменшення впливу його РТП на ОТП)

Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Залежність (значення)	Достовірність апроксимації, R^2
0,16 … 6	d_2/d_1= 0,1182ln(λ_2) + 1,7959	0,9
6 … 12	d_2/d_1= 0,0028 λ_2 + 1,954	0,95
>12	d_2/d_1= 1,99	-

Питома теплоємність БП на основі бензину та БЕ може змінюватися в межах 2,3 … 2,39 МДж/кг К, тобто в межах 9%. Якщо припустити подібну відсоткову зміну теплопровідності вказаних палив, можна дійти висновку, що коефіцієнт РТ змінюється в межах 0 … 9% залежно від концентрації БЕ в бензині.

Таким чином, РТП в трубці ТАВ залежить від добутку різниці температур між НЕ та зовнішньою поверхнею трубки витратоміра, коефіцієнтів конструктивного та РТ ТАВ. Причому внутрішній ДТ витратоміра не впливає на величину РТП, оскільки можна прийняти $d_3 \approx d_2$.

3.5 Комп’ютерне моделювання осьового теплового потоку в трубці термоанемометричного витратоміра

Сучасні автовиробники використовують для визначення ВП двигуном автомобіля сукупність даних та показів датчиків: витрати повітря, обертів КВ, часу впорскування палива, тиску в системі живлення, токсичності відпрацьованих газів двигуна тощо. Такій підхід має низку недоліків: наявність у складі приладів механічних елементів, які з часом змінюють свої властивості, вплав на них вібрацій і динамічних навантажень, не завжди охоплення повного

діапазону можливих витрат конкретним ДВЗ на всіх режимах його роботи, низька точність вимірювання тощо. Вказані недоліки особливо проявляються у процесі використання БП і можуть бути частково або повністю усунені вдосконаленням конструкцій витратомірів. ТАВ найкраще, порівняно з усіма існуючима, задовольняють умови експлуатації на автомобілях з двигунами, що працюють на різних паливах, зокрема і на БП. Конструкція витратоміра має трубку, в якій встановлено НЕ та ТП.

Водночас за всіх можливих швидкостей руху палива через витратомір не має виникати турбулентних рухів в потоці, оскільки вони будуть негативно впливати на розподіл температур в місцях розташування термоперетворювачів $a_{0\text{-}1}…a_{3\text{-}13}$ (рис. 3.6).

Комп’ютерне моделювання проведено в CFD-комплексі COSMOS FloWorks. В такому середовищі теплообмін і рух у різних точках об’єму палив аналізуються рівняннями Нав’є – Стокса, що описують закони збереження енергії, імпульсу та маси в нестаціонарній постановці. Окрім цього використовуються рівняння стану компонентів палив, а також емпіричні залежності їх в’язкості та теплопровідності від температури. Ньютонівські рідини задаються залежністю їх коефіцієнта в’язкості від швидкості зсувних деформацій та температури; палива, що стискаються, описано залежністю їх густини від тиску. Вказаними рівняннями моделюються потоки з різними рухами: турбулентні, ламінарні та потоки, в яких присутні перехідні процеси від ламінарного до турбулентного і навпаки.

Для моделювання процесів термо- та гідродинаміки у витратомірі бралися до уваги такі параметри: ВП, температура палива (бензин, БЕ, ДП та ОРП) на вході витратоміра, діаметр і температура НЕ, внутрішній ДТ витратоміра, тиск та температура на виході з витратоміра (рис. 3.11).

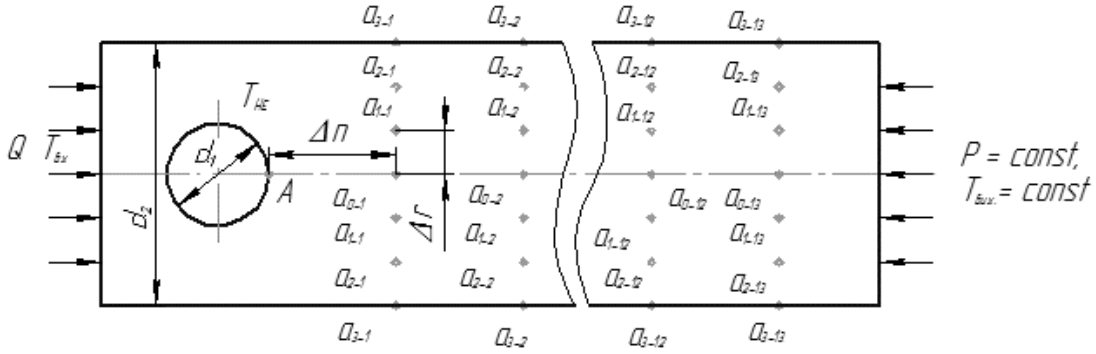


Рисунок 3.11 – Комп'ютерна модель витратоміра, що досліджувалася: Q – ВП, л/год; $T_{ВХ}$ – температура палива на вході, К; d_2 – внутрішній діаметр трубки, мм; d_1 – діаметр НЕ, мм; $T_{НЕ}$ – температура НЕ, К; $T_{ВИХ}$ – температура палива на виході з витратоміра, К; P – тиск на виході витратоміра, Па; Δn – крок розташування ТП вздовж осі трубки витратоміра, мм; Δr – радіальний крок між точками розрахунків температур (Δr=d_2/6), мм; $a_{0\text{-}1}$ … $a_{3\text{-}13}$ – точки розрахунків температури; A – зовнішня точка поверхні НЕ

Авторська розробка.

По осі трубки витратоміра запропоновано встановити 13 ТП з кроком в 1 см (n – порядковий номер ТП і, відповідно, відстань від НЕ в см). Метою моделювання було визначити пару послідовно встановлених ТП з найбільшою різницею температур. Очевидно, що для забезпечення процесу вимірювання потрібно мати найвищу температуру в потоці палива в точці A поверхні НЕ. В процесі моделюванні були прийнято, що внутрішня поверхня трубки витратоміра має ідеальну шорсткість і не поглинає тепло, рух палива на вході ламінарний. Як палива вибирали БЕ, ОРП, яка має властивості близькі до РО, бензин та ДП (табл. 3.3).

Процес моделювання розподілу температури вздовж осі трубки ТАВ проведено в декілька етапів. На першому етапі визначали відношення діаметра НЕ до внутрішнього діаметра трубки ТАВ, за

яких різниця температур між точками, що розташовані найближче і найдальше від НЕ, буде максимальною для кожного з палив. Було прийнято: Q = 25 л/год, $T_{ВХ}$ = 293,2 К, $T_{НЕ}$ = 573,2 К, $T_{ВИХ}$ = 293,2 К, d_2 = 6 мм, d_1 = 1…5 мм (з кроком 1 мм), Δn = 1 см.

В результаті моделювання отримано залежності, що описують значення температур в точках по осі трубки витратоміра для вказаних палив (рис. 3.12–3.15).

Таблиця 3.3 – Властивості палив, витрата яких досліджувалася

Паливо	Густина, кг/м^3	Динамічна в'язкість, Па*с	Теплоємність, Дж/(кг*К)	Теплопровідність, Вт/(м*К)
Бензин	730	0,00053	1840	0,153
ДП	872,7	0,0064	1845	0,1169
БЕ	790	0,00114	2396,4	0,181
ОРП	913	0,084	1736	0,178

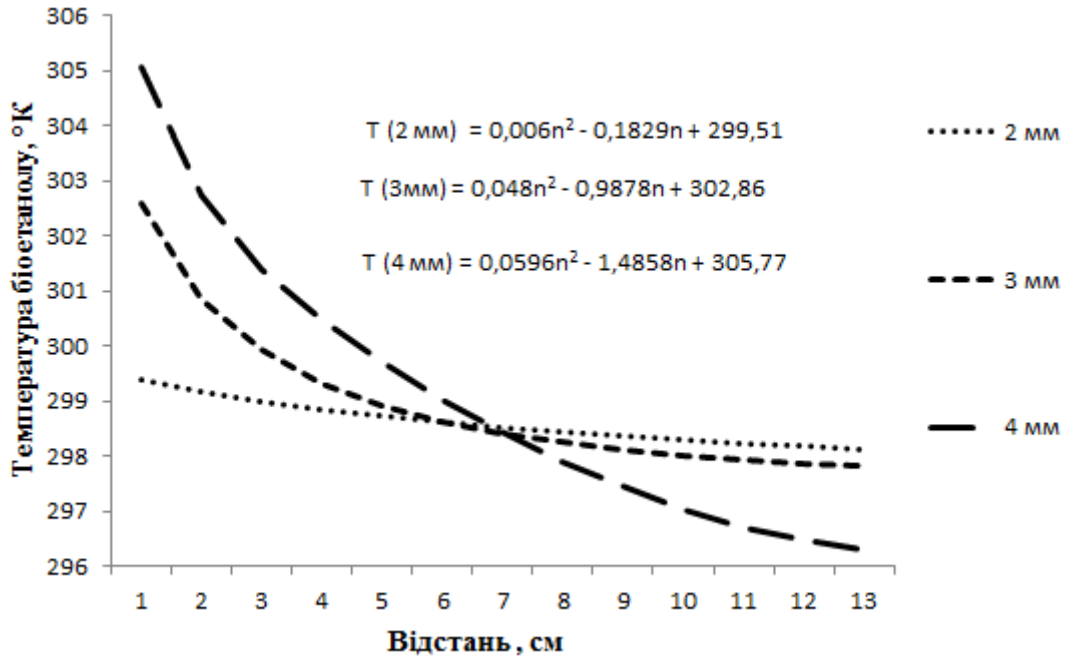


Рисунок 3.12 – Зміна температури БЕ від відстані до НЕ для d_1 = 2, 3, 4 мм (R^2 = 0,95–0,97)

Авторська розробка.

З рис. 3.12 видно, що для ВВ БЕ витратоміром з d_2 = 6 мм краще використовувати НЕ d_1 = 4 мм, коли різниця температур за довжиною трубки ТАВ найбільша ΔT = 8,77 К. За значень менших d_1 = 2 мм прогрівання палива недостатнє, ΔT зменшується, що призведе до погіршення точності вимірювань. Діаметри більші d_1 = 5 мм сприяють турбулентному руху палива, а це призводить до збільшення температури БЕ біля стінок трубки та зменшення її різниці між сусідніми ТП, що також негативно вплине на точність ВВ.

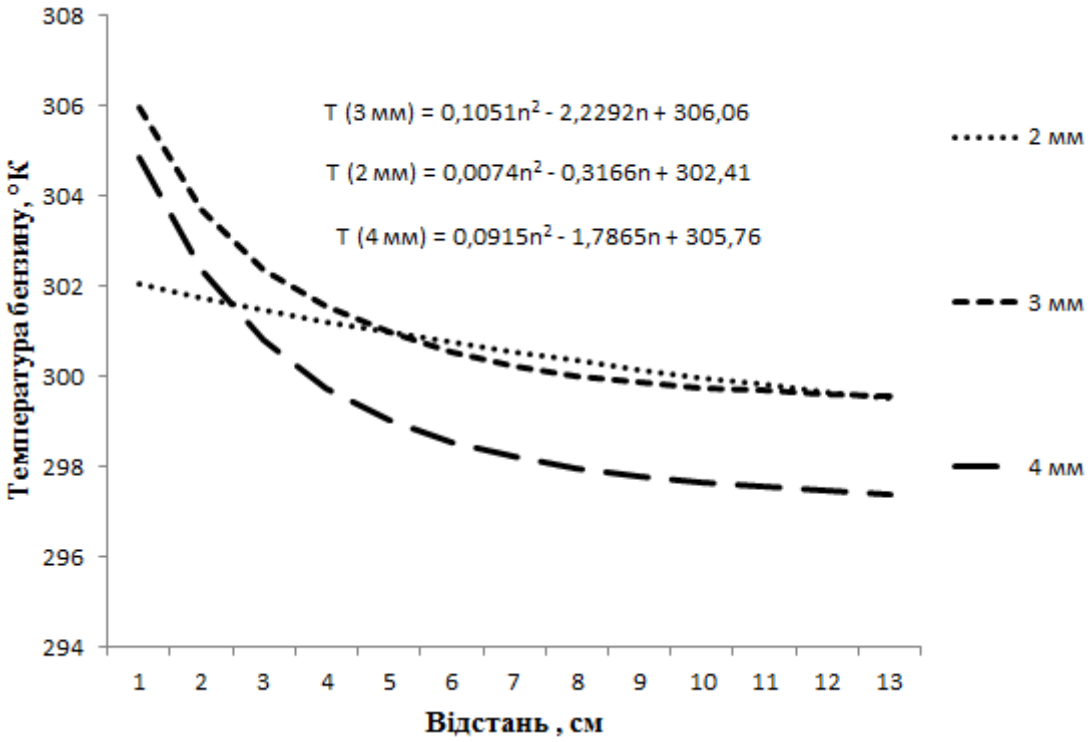


Рисунок 3.13 – Зміна температури бензину від відстані до НЕ для d_1 = 2, 3, 4 мм (R^2 = 0,95–0,99)

Авторська розробка.

З рис. 3.13 видно, що, використовуючи ТАВ для ВВ бензину, доцільно вибирати НЕ з d_1 = 4 мм. Зокрема ΔT = 7,45 К

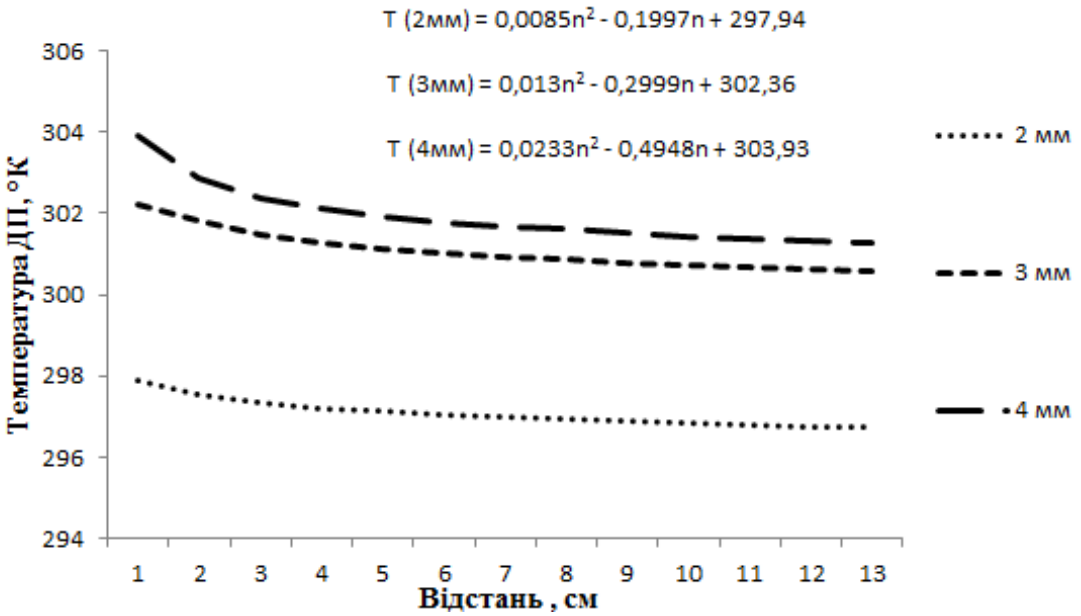


Рисунок 3.14. – Зміна температури ДП від відстані до НЕ для d_1 = 2, 3, 4 мм (R^2 = 0,95–0,99)

Авторська розробка.

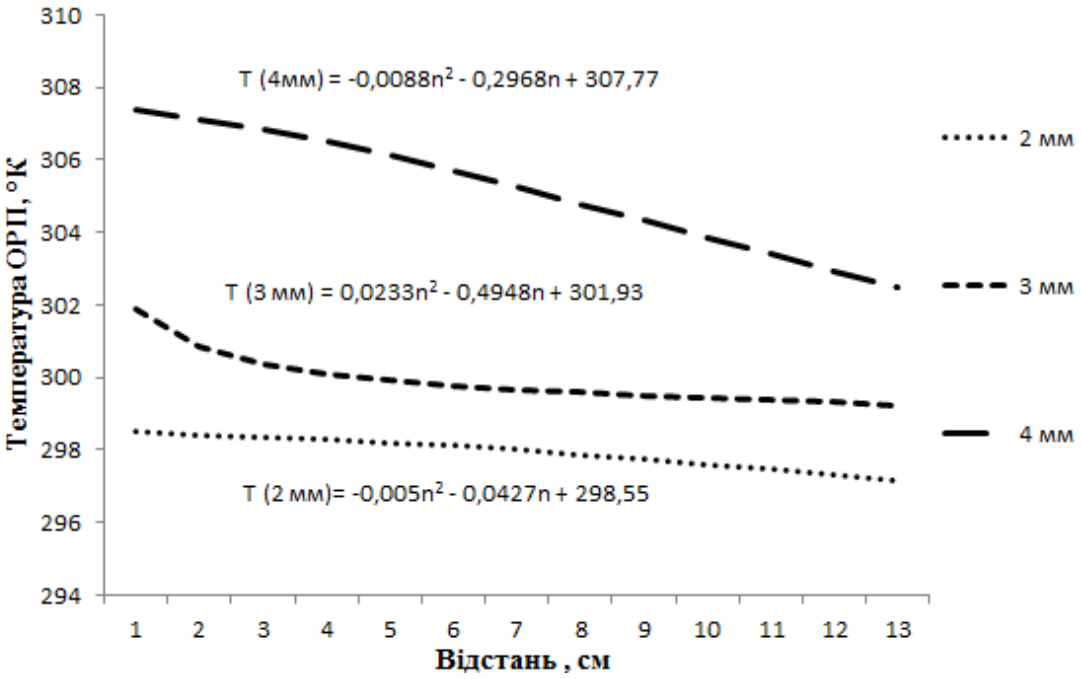


Рисунок 3.15 – Зміна температури ОРП від відстані до НЕ для d_1 = 2, 3, 4 мм (R^2 = 0,95–0,99)

Авторська розробка.

Аналіз рис. 3.14 показав, що для ДП доцільно використовувати НЕ з діаметром d_1 = 4 мм, водночас ΔT = 2,64 К.

У разі моделювання потоку ОРП спостерігається зовсім інший характер зміни температур за НЕ d_1 = 4 мм, водночас ΔT = 4,89 К. Це, ймовірно, викликано величиною динамічної в'язкості ОРП порівняно з іншими паливами.

Встановлено, що найбільша різниця температур між сусідніми термоперетворювачами вздовж осі трубки ТАВ для всіх палив, що досліджувалися, спостерігається, коли діаметр НЕ d_1 = 4 мм та діаметр трубки витратоміра d_2 = 6 мм. З високою імовірністю можна стверджувати, що це пов'язано з площею поверхні передачі тепла від НЕ до палива на вибраних швидкостях його руху (вибраних витратах).

На другому етапі дослідження визначались залежності зміни температур по осі трубки ТАВ від різних витрат вказаних палив. Було прийнято, що ВП ДВЗ складає від 5, …, 25 л/год. Моделювання проведено через кожні 5 л/год.

Підвищення значень температур НЕ мало на меті збільшити різницю температур між сусідніми термоперетворювачами з урахуванням, що максимальна температура палива має бути меншою за температуру його спалахування. Використовуючи отримані вище розміри НЕ, трубки ТАВ та відомі значення ВП, максимальну допустиму температуру НЕ з умови відсутності спалахування палив, отримано значення температур вздовж осі трубки ТАВ від відстані до НЕ (рис. 3.16–3.19).

З рис. 3.16–3.19 видно, що для більшості палив максимальна відстань від НЕ, за якої різниця температур палива максимальна, складає 7 см. Однак для ОРП така різниця температур спостерігається на більшій відстані від НЕ і складає до 13 см, що може пояснюватись суттєвою різницею динамічної в'язкості ОРП порівняно з іншими паливами.

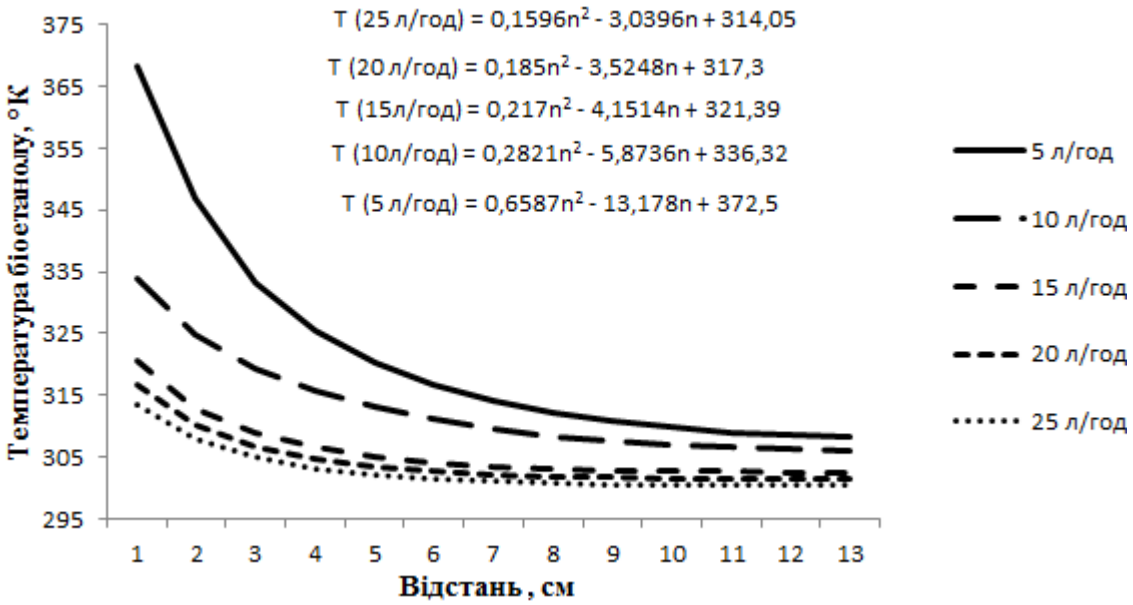


Рисунок 3.16. – Зміна температури БЕ від відстані до НЕ (R^2=0,92-0,97)

Авторська розробка.

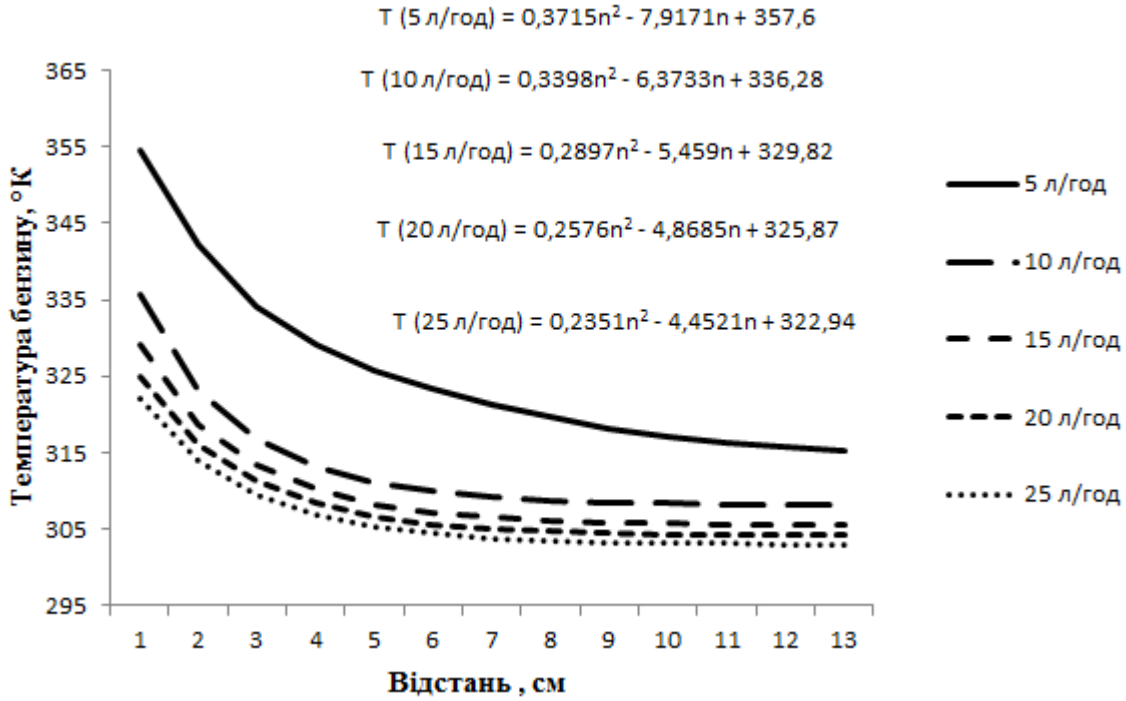


Рисунок 3.17. – Зміна температури бензину від відстані до НЕ (R^2=0,9-0,96)

Авторська розробка.

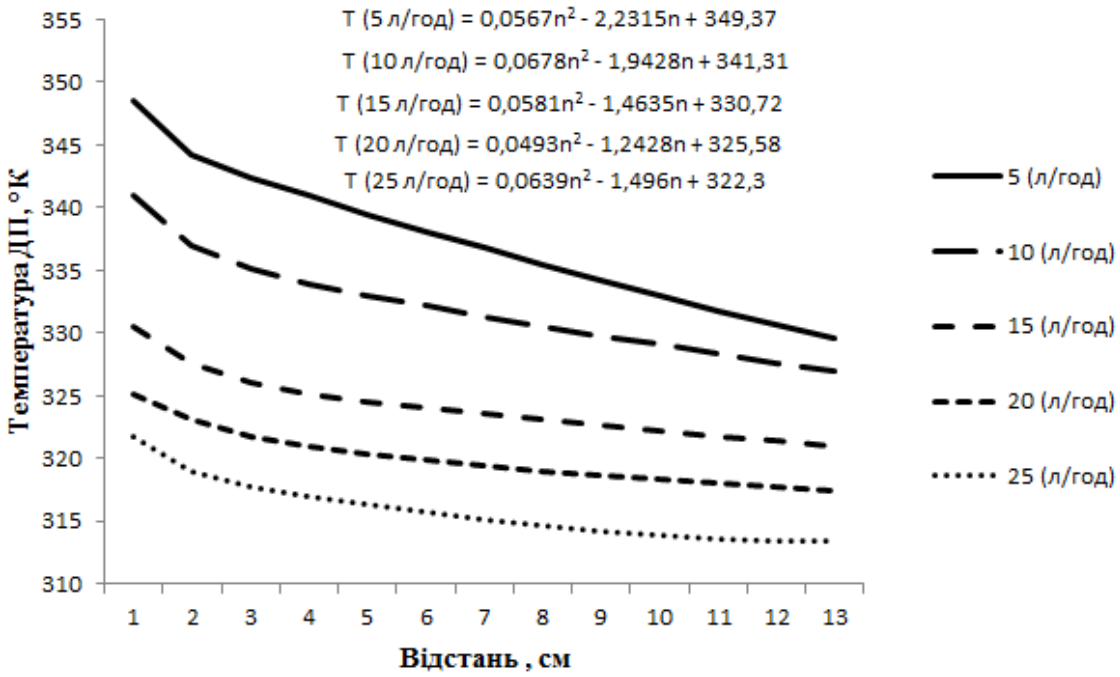


Рисунок 3.18 – Зміна температури ДП від відстані до НЕ (R^2 = 0,92–0,99)

Авторська розробка.

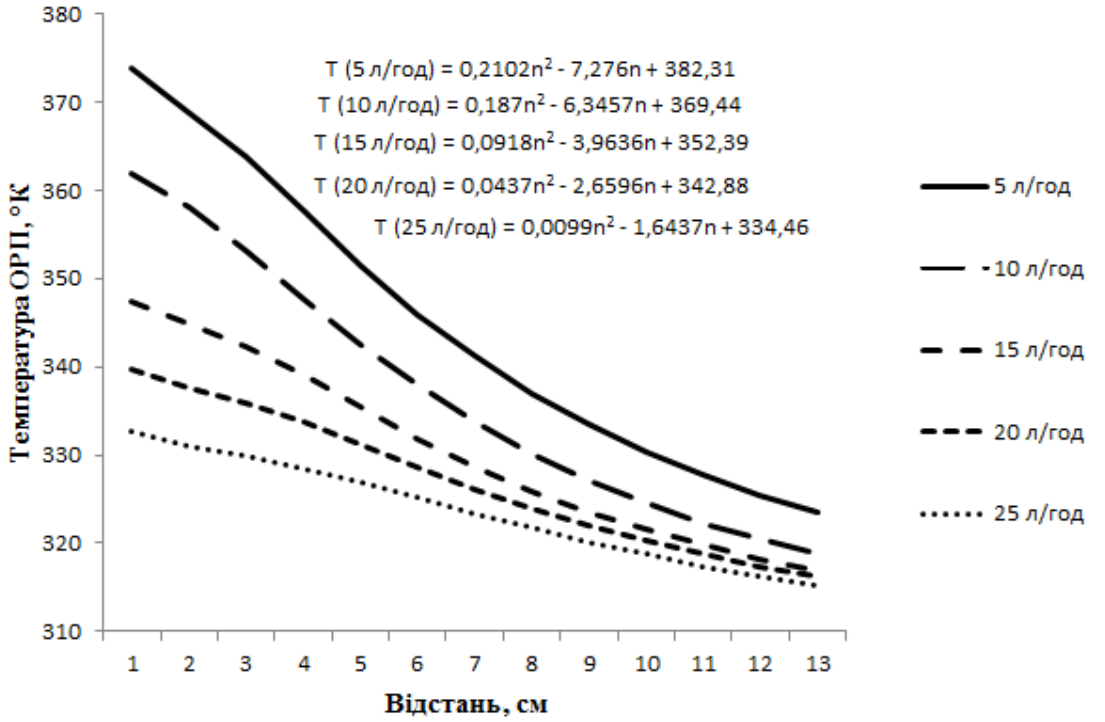


Рисунок 3.19 – Зміна температури ОРП від відстані до НЕ (R^2=0,99)

Авторська розробка.

Проміжні значення температур, що реєструються термоперетворювачами, для інших значень діаметрів НЕ можна отримати інтерполяцією.

3.5.1 Моделювання осьового теплового потоку витратоміра залежно від вмісту олій рослинного походження в дизельному паливі

В процесі отримання даних розподілу температур вздовж осі трубки витратоміра залежно від відстані до НЕ потрібно дослідити різні ОК біодомішок в ДП для різних їх витрат. Для вирішення такої задачі доцільно проводити комп'ютерне моделювання та за допомогою відомих систем диференціальних рівнянь отримувати динаміку теплообміну. У [16] встановлено, що для ОРП і ДП у ТАВ достатньо використовувати шість ТП, що їх встановлено вздовж осі трубки витратоміра. Для БП на основі ДП з різним вмістом ОРП потрібно встановлювати більше ТП, а за результатами моделюваня прийняти рішення про їх кількість також для інших БП, що безпосередньо вплине та покращить чутливість ТАВ, зменшить загальну ПВ.

Аналіз існуючих досліджень доводить, що вони не розглядають ОТП ТАВ для сумішей ОРП в ДП з різною ОК. В [101] вказано, що відомі ТАВ мають два ТП, причому перший розташований безпосередньо на НЕ, а другий – на заданій відстані від НЕ. Встановлення НЕ та датчиків температур конструктивно можливе по осі та біля трубки ТАВ. Але це не забезпечує потрібну точність ВВ, ТАВ має змінну чутливість щодо відносно великих діапазонів витрат, які характерні для ДВЗ АТЗ.

Потребують визначення залежності температур сумішей ОРП в ДП різних ОК від відстані до НЕ для різних значень їх витрат. Потрібне обґрунтування мінімальної кількості ТП для кожного з

вказаних палив, що забезпечить підвищення точності ВВ та чутливість ТАВ.

В дослідженні використана модель ТАВ, що складається з трубки з встановленим по осі НЕ. Для моделювання процесів гідро- та термодинаміки вибрано такі значення параметрів: ВП Q = 5…25 л/год, температура палива $T_{вх}$ = 293 К (ОРП, ДП та їх суміші різних ОК) на вході витратоміра, діаметр НЕ d_2 = 4 мм, температура НЕ T_H = 973 К, внутрішній діаметр трубки d_1 = 6 мм, тиск P = 0,1 МПа та температура $T_{вих}$ = 293 К на виході з витратоміра. Прийнято, що за вказаними параметрами трубки ТАВ та НЕ паливо прогрівається до: ДП – 610 К, ОРП – 712 К, що не перевищує допустимі.

Таблиця 3.4 – Властивості БП на основі ДП

Паливо	Густина, кг/м^3	Динамічна в’язкість, Па*с	Теплоємність, Дж/(кг*К)	Теплопровідність, Вт/(м*К)
ДП	872,7	0,0064	1845	0,1169
ДП 25% + ОРП 75%	882,8	0,0258	1814	0,1321
ДП 50% + ОРП 50%	892,9	0,0452	1788	0,1474
ДП 75% + ОРП 25%	902,9	0,0646	1762	0,1627
ОРП	913	0,084	1736	0,178

В моделюванні прийнято припущення та спрощення: шорсткість внутрішньої поверхні трубки не впливає на результат,

вона не проводить тепло, потік палива ламінарний, за домішкиу до ДП обрано ОРП, яка близька за властивостями до РО (табл. 3.4), ОК ОРП в ДП змінюється від 0 до 100% з кроком 25%. За результатами моделювання побудовано залежності значень температур по осі трубки витратоміра (рис. 3.20–3.22).

За різницею температур на відстані 1 см та 6 см до НЕ практично неможливо визначити ОК ОРП в ДП, оскільки температура різних вказаних палив на відстані в 6 см практично однакова.

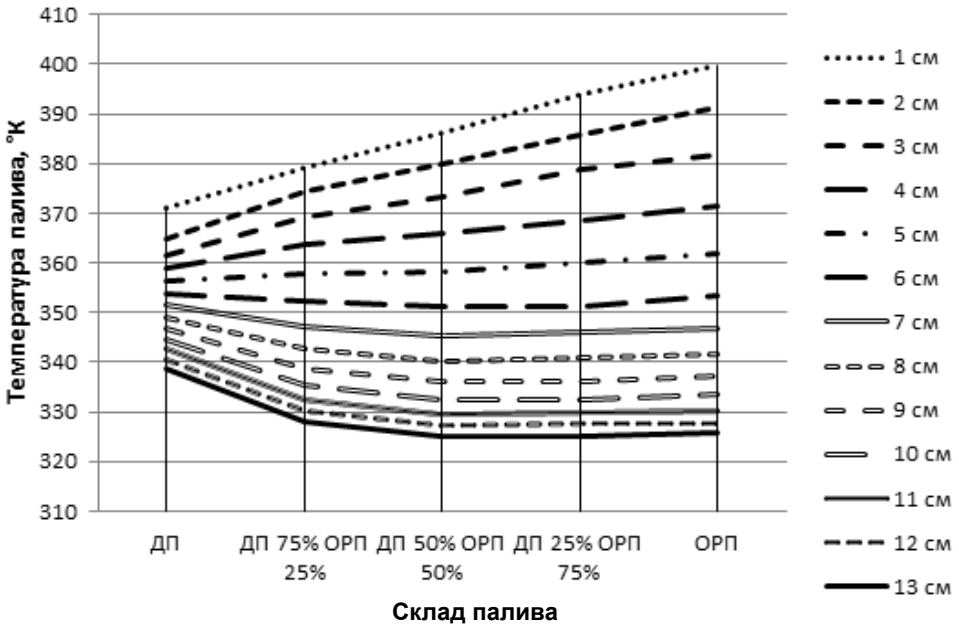


Рисунок 3.20 – Зміна температури ДП, ОРП та їх сумішей від відстані до НЕ при витраті 5 л/ год

Авторська розробка.

З рис. 3.20 видно, що на відстані 6 см і далі вздовж осі ТАВ спостерігається незначна зміна температури потоку, що пояснюється термофізичними властивостями досліджуваних палив.

За результатами моделювання можна зробити висновок, що у разі збільшення ОК ОРП різниця температур палива збільшується на відстані 1 см до НЕ та 13 см до НЕ. Математичні залежності, що

описують розподіл температуп палив з різною ОК ОРП в ДП від відстані до НЕ та витрат 10–20 л/год наведено в табл. 3.5.

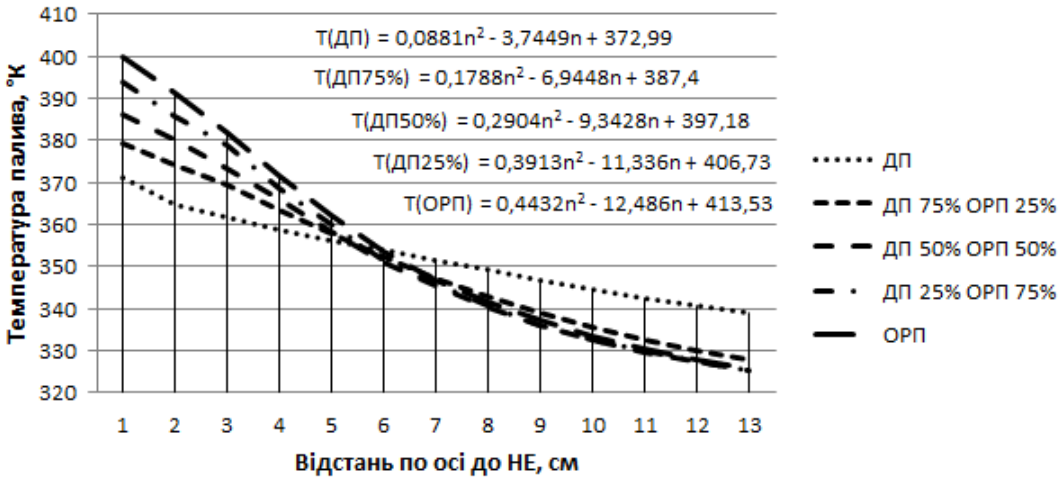


Рисунок 3.21 – Зміна температури ДП, ОРП та її різної ОК від відстані до НЕ при витраті 5 л/год.

Авторська розробка.

Аналіз отриманих даних показує, що у разі збільшення ВП збільшується відстань до НЕ, в якій температури різних за ОК ОРП в БП збігаються, тому для палив з різною ОК ОРП кількість ТП потрібно збільшувати порівняно з [16], що пов’язано з термофізичними властивостями даних БП.

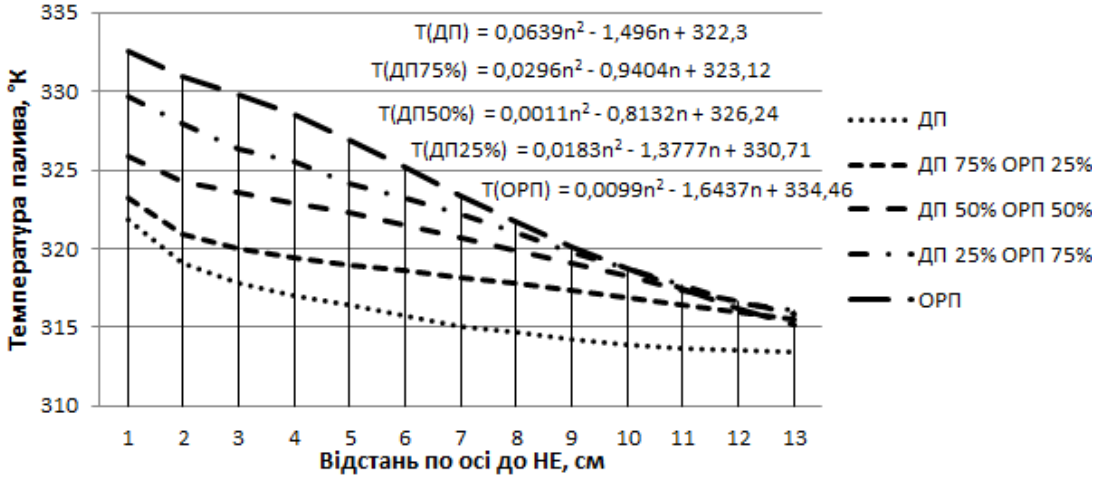


Рисунок 3.22 – Зміна температури ДП, ОРП та різної ОК від відстані до НЕ при витраті 25 л/год.

Авторська розробка.

Таблиця 3.5 – Залежності температур палив з різною ОК ОРП в ДП від відстані до НЕ та витрат 10 – 20 л/год

ВП, Q, л/год	Температура, К
10	$T(ДП) = 0,0678n^2 - 1,9428n + 341,31$
	$T(ОРП\ 25\%) = 0,0231n^2 - 2,3358n + 351,15$
	$T(ОРП\ 50\%) = 0,0781n^2 - 3,9664n + 358,87$
	$T(ОРП\ 75\%) = 0,1378n^2 - 5,2972n + 364,68$
	$T(ОРП) = 0,187n^2 - 6,3457n + 369,44$
15	$T(ДП) = 0,0581n^2 - 1,4635n + 330,72$
	$T(ОРП\ 25\%) = 0,0087n^2 - 1,1477n + 334,63$
	$T(ОРП\ 50\%) = 0,0195n^2 - 2,0541n + 342,66$
	$T(ОРП\ 75\%) = 0,0503n^2 - 2,9978n + 347,78$
	$T(ОРП) = 0,0918n^2 - 3,9636n + 352,39$
20	$T(ДП) = 0,0493n^2 - 1,2428n + 325,58$
	$T(ОРП\ 25\%) = 0,0152n^2 - 0,8885n + 327,42$
	$T(ОРП\ 50\%) = 0,0041n^2 - 1,252n + 333,25$
	$T(ОРП\ 75\%) = 0,038n^2 - 2,2386n + 339,39$
	$T(ОРП) = 0,0437n^2 - 2,6596n + 342,88$

3.6 Математична модель термоанемометричного витратоміра біопалив

Для КВБ на АТЗ можна використовувати витратоміри різних типів. Крім АТЗ витратоміри використовуються в сільськогосподарській техніці (завантажувачі, комбайни, трактори тощо), будівельній спецтехніці, річному та морському транспорті, в техніці для армії тощо.

На сьогодні існують різні види витратомірів палива, класифікація яких враховує тип палива, діапазони витрат, наявність і вигляд вихідного сигналу (аналоговий, імпульсний тощо), вид системи

передачі даних, наявність власного індикатора та деякі інші параметри. В списку найбільш затребуваних витратомірів: коріолісові, ультразвукові, турбінні, теплові масові, гвинтові, поршневі, калориметричні, поплавцеві, магнітно-індукційні тощо.

Кожний з даних видів витратомірів рідини має свої особливості, специфіку, переваги та недоліки.

Найбільш привабливим для виміру витрат БП сьогодні вважається ТАВ. Зміна температурного поля вздовж осі витратоміра відбувається за певною функціональною залежністю від величини ВП. Тому за розподілом температурного поля вздовж осі ТАВ можна з достатньою точністю визначити його витрату.

Таким чином, задача дослідження процесу роботи ТАВ, удосконалення його математичної моделі є актуальною.

У відомих ТАВ значення параметрів теплового поля отримують за допомогою одного або двох ТП, які розташовано біля НЕ або з обох сторін на певній відстані. Математична модель існуючих ТАВ є рівнянням теплового балансу НЕ, на температуру якого впливає потік палива, а визначення ВП проводять за значенням різниць температур в двох фіксованих точках вздовж осі ТАВ.

В розробленому високоточному ТАВ використано групи ТП, що дає визначення параметрів температурного поля в багатьох точках потоку палива, а компенсація низки похибок вимірювань досягається алгоритмічною обробкою отриманих значень.

Тому для ТАВ потрібно розробити математичну модель відтворювання розподілу поля температур в усіх точках простору в потоці палива, на місцях встановлення ТП. Це вимагає проведення відповідного моделювання його роботи. Для цього потрібно: проаналізувати існуючу математичну модель температурного поля в потоці БП; провести числове моделювання теплового балансу НЕ в рухомому потоці палива через ТАВ; отримати нову математичну

модель розподілу температурного поля вздовж трубки ТАВ та визначити уточнене значення витрати БП; запропонувати методи підвищення точності та швидкодії ТАВ.

В роботах [14, 19, 25, 30] описано конструкції та принцип дії існуючих сьогодні витратомірів палив, проаналізовано сучасні ТП, що можуть бути використані в конструкції ТАВ, визначено їх недоліки та переваги, наведено основні характеристики.

В математичну модель температурного поля потоку БП введено такі обмеження, припущення та умови:

- НЕ має постійну потужність і стаціонарний тепловий вплив;
- ТП розташовано вздовж осі досліджуваного потоку, що дає можлівість визначати розподіл температур вздовж однієї координати простору;
- розглянуто турбулентний та ламінарний режими руху БП;
- оскільки діапазон виміру початкової температури БП в процесі використання ТАВ достатньо великий, передбачено корекцію показів витратоміра урахуванням зміни цієї температури.

Густину теплового потоку між поверхнею НЕ та БП можна подати у вигляді [14, 162]:

$$q = \alpha \Delta T, \tag{3.17}$$

де ΔT – різниця температур між поверхнею НЕ та початковою температурою БП (або НС), К;

α – коефіцієнт конвективної тепловіддачі.

Рівняння теплового потоку БП в нерухомому середовищі з урахуванням теплопровідності має вигляд:

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dR} = -\lambda 4\pi R^2 \left(-\frac{R_H^2}{R^2}\right)(T_0 - T_H) = 4\pi\lambda R_H^2 \Delta T, \quad (3.18)$$

де T_H – температура на поверхні НЕ, К;

T_0 – початкова температура БП, К.

Також тепловий потік радіусом $R_н$ та площею поверхні $S_н$ можна визначити за рівнянням:

$$Q = qS_H = 4\pi R_H^2 (T_0 - T_H) \quad (3.19)$$

З (3.17) та (3.18) отримаємо:

$$\alpha = \lambda / R_H \quad (3.20)$$

Вираз для розрахунку температури НЕ за постійної швидкості руху БП має вигляд:

$$T_{\text{Н}} = T_0 + \frac{P}{\pi l_{\text{Н}} K_1} \left(\frac{\pi v d_2}{4Q_v}\right)^{K_2} (\mu C)^{-K_3} \lambda^{1-K_3}, \quad (3.21)$$

де P – потужність НЕ, Вт;

μ – коефіцієнт динамічної в’язкості БП;

λ та C – в’язкість та теплоємність БП;

d_2 – диаметр трубки ТАВ, мм;

$K_1 = K_2 = 0{,}5$;

$l_н$ – відстань до НЕ, мм;

Q_v – об’ємна витрата БП, мм^3/с.

$$Q_v = K_4 K_5 (T_0 - T_H)^{-1/K_2}, \quad (3.22)$$

де K_4 – коефіцієнт, що враховує конструктивні параметри ТАВ.

$$K_4 = \frac{\pi d_2}{4}\left(\frac{P}{\pi l_H}\right)^{1/K_2};$$

$$K_5 = v(\mu C)^{K_3/K_2}\lambda^{(K_3-1)/K_2}K_1^{-1/K_2}, \quad (3.23)$$

де K_5 - коефіцєнт, що враховує ФХВ БП та режим його руху.

3.7 Моделювання теплового балансу нагрівального елемента витратоміра в рухомому потоці палива

З використанням формул (3.22), (3.23) виконано числове моделювання за допомогою ЕОМ теплового балансу НЕ в рухомому потоці палива. ФХВ палива наведено в табл. 3.6, а конструктивні параметри ТАВ – в табл. 3.7.

Результати моделювання теплового балансу НЕ ТАВ наведено на рис. 3.23–3.24. Аналіз показав, що для підвищення точності вимірювання витрат БП слід одночасно вимірювати температуру палива в декількох точках потоку. Після обробки результатів на ЕОМ отримано математичну модель (3.24) розподілу температурного поля вздовж трубки і уточнено значення витрати БП.

Нова формула для визначення температури палива уздовж осі трубки ТВ при ламінарному русі палива в трубці, з урахуванням числа π:

$$T(x) = T_H - \left[\frac{\pi x\alpha}{Q_v} - \frac{7}{48}\right]\frac{4P}{\pi d_2\lambda} = \frac{P}{d_2\lambda}\left[\frac{4x\alpha}{Q_v} - 0{,}186P\right]. \quad (3.24)$$

Таблиця 3.6 – Физико-механічні властивості палив [66, 73, 134]

Параметр	Бензин	ДП	БП
Густина, кг/м^3	750	805	865
Питома теплоємність, кДж/(кг·К)	2,2	2,1	1,5
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	0,11	0,11	0,17
Коефіцієнт температуропровідності, м^2/с	$6{,}67\cdot10^{-8}$	$6{,}51\cdot10^{-8}$	$1{,}32\cdot10^{-7}$
Коефіцієнт кинематичної в’язкості, м^2/с	$4{,}93\cdot10^{-7}$	$2{,}11\cdot10^{-6}$	$4{,}25\cdot10^{-6}$
Коефіцієнт динамічної в’язкості, Па·с = Н·с/м^2 = кг/(м·с)	$0{,}37\cdot10^{-3}$	$1{,}70\cdot10^{-3}$	$3{,}64\cdot0^{-3}$

Таблиця 3.7 – Конструктивні параметри ТАВ

Параметр	Значення для випадків		
	I	II	III
Діаметр трубки, мм	15	10	5
Довжина трубки, мм	300		
Діаметр НЕ, мм	3	3	1
Довжина НЕ, мм	12		
Потужність НЕ, мм	12		

Вимірюючи за допомогою термоперетворювача температуру поверхні НЕ і температуру БП на відстані x від НЕ, визначаємо об’ємну витрату БП і, з урахуванням значення числа π, отримаємо в підсумку:

$$Q_v = \frac{\pi x \lambda}{\frac{\pi d_2 \lambda \left(T_H - T(x)\right)}{4P} + \frac{7}{48}} = \frac{21{,}53 x \lambda P}{5{,}38 d_2 \lambda \left(T_H - T(x)\right) + P} \qquad (3.25)$$

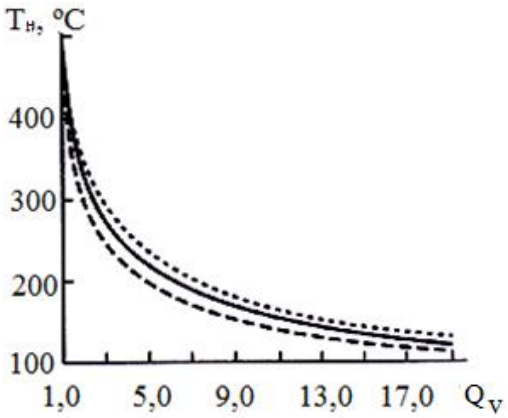


Рисунок 3.23 – Залежність температури НЕ $T_н$ від ВП: ---- – бензин; ···· – ДП; — – БП

Авторська розробка.

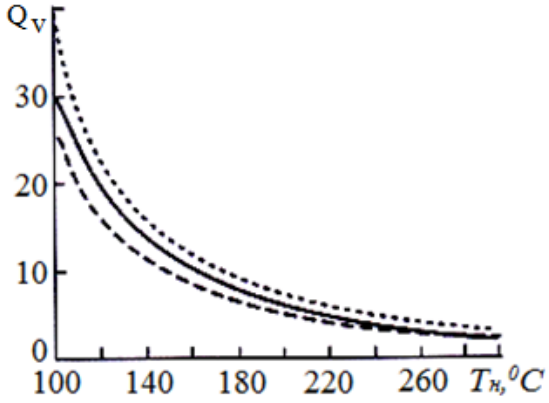


Рисунок 3.24 – Залежність ВП від температури НЕ: ---- – бензин; ···· – ДП; — – БП

Авторська розробка.

У разі турбулентного потоку БП остаточно, з урахуванням значення числа π, вираз для розрахунку температури на відстані *x* від НЕ має вигляд:

$$T(x) = T_H - T_{exp}\left[-0{,}11\left(\frac{\pi}{4}\right)^{0,2}\frac{xv^{0,2}}{d_{mp}^{0,8}W^{0,2}}\right] + T \qquad (3.26)$$

Вимірюючи за допомогою термоперетворювача температуру поверхні НЕ, температуру НС і температуру БП на відстані *x* від НЕ, визначаємо об'ємну витрату БП:

$$Q_v = \left(\frac{K_8K_9x}{ln[T(x)-T]-ln[T_H-T]}\right)^5 = \left(\frac{-0{,}105K_9x}{ln[T(x)-T_H]}\right)^5, \qquad (3.27)$$

де $K_8 = -0{,}11(\pi/4)^{0,2} = -0{,}105$; $K_9 = (\nu)^{0,2}/(d_2)^{0,8}$.

Для підвищення точності вимірювань у процесі ламінарного і турбулентного режимів потоку палива температуру *T(x)* слід вимірювати в декількох точках потоку БП і використовувати процедуру ЛА.

В результаті моделювання на ЕОМ, виконаного за постійної ВП 5 л/год для різних видів палива (бензин, ДП і БП) і різних відстаней від НЕ *x*, отримано графіки (рис. 3.25).

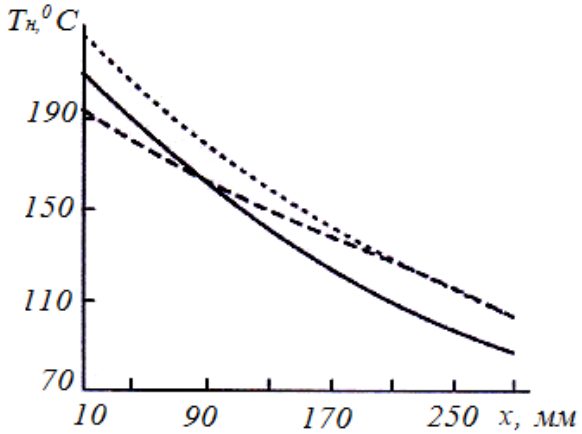


Рисунок 3.25 – Залежності $T_н$ від *x* (d_2 = *15 мм;* d_1 = *3 мм*): ----- – бензин; ⋯⋯ – ДП; —— – БП; похибка ТП 5 °С

Авторська розробка.

Отримані результати свідчать про те, що об’ємна ВП залежить від похибок вимірювання температури ТП в діапазоні відносних похибок 0,01; …; 1,0%. Моделювання похибок виконано з використанням палив для вказаних нижче варіантів (рис. 3.26):

- визначення вирати за результатами вимірювання температури НЕ і початкової температури палива (варіант I);
- визначення ВП за результатами вимірювання початкової температури палива та температури в двох точках вздовж осі ТАВ з подальшим усередненням для обох точок (варіант II);
- підвищення точності варіанта II досягається алгоритмічною компенсацією динамічних і випадкових похибок використанням штучних нейронних мереж (НМ) (варіант III);
- підвищення точності варианта I за допомогою апроксимації результатів значень температури ТП та компенсації похибок (варіант IV);
- підвищення точності варианта II за допомогою апроксимації результатів вимірювання температури ТП та компенсації похибок вимірювань (варіант V);

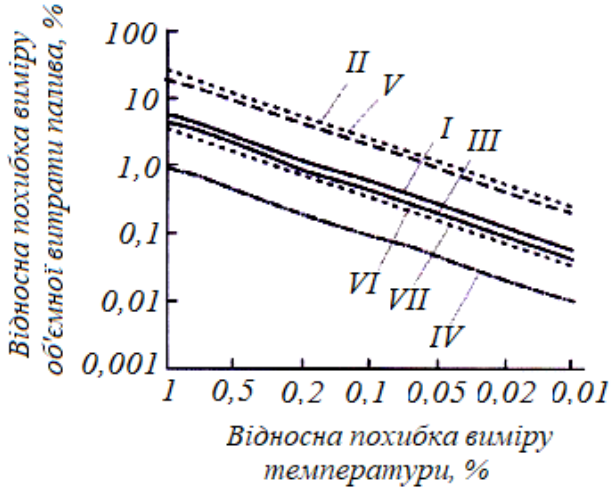


Рисунок 3.26 – Результати моделювання на ЕОМ похибок ТАВ з використанням БП для варіантів I–VII

Авторська розробка.

Підвищення точності варианта I за допомогою [156]:

- алгоритмічної компенсації випадкових та ДНП з використанням штучних НМ (варіант VI);
- апроксимації результатів вимірювання температури і компенсації похибок цих вимірювань (варіант VII).

Підвищення точності варианта II за допомогою:

- алгоритмічної компенсації випадкових і ДНП з використанням штучних НМ (варіант VIII);
- апроксимації результатів вимірювання температури ТП і компенсації похибок цих вимірювань (варіант IX).

Як видно з рис. 3.26, за мінімальних обсягів алгоритмічних обчислень доцільно використовувати варіант I, що забезпечує точність вимірювання об'ємної ВП Q_v = 3% у разі точності вимірювання температури НЕ $T_н$ = 1%.

3.7.1 Результати моделювання теплового балансу нагрівального елемента витратоміра в рухомому потоці палива

Як підсумок проаналізована існуюча математична модель температурного поля потоку БП в ТАВ. Проведено числове моделювання теплового балансу НЕ в рухомому потоці палива та встановлено, що підвищення точності досягається одночасним вимірюванням температур палива в заданих точках потоку. Оскільки в існуючих витратомірах для вимірювання поля температур використовуються не більше двох ТП, математичне моделювання процесу в існуючих ТАВ зводимо до отримання виразу для теплового балансу НЕ, який охоплюється холодним потоком палива, або до отримання різниць температур в місцях встановлення ТП. В розробленому ТАВ підвищення точності ВВ досягається

використанням групи ТП, що дозволяє визначати температури поля в багатьох точках потоку, а подальша алгоритмічна обробка значень температур компенсує низку похибок вимірювань. Тому після алгоритмічної обробки значень температур на ЕОМ отримано нову математичну модель розподілу температурного поля вздовж трубки ТАВ та уточнене значення витрати БП.

Щоб підвищити точність вимірювань у разі ламінарного і турбулентного режимів вимірювання слід проводити в декількох точках потоку БП і використовувати ЛА. Проведено моделювання на ЕОМ, для постійної об'ємної ВП для різних їх видів та різних відстаней від НЕ. Отримані результати показують, що об'ємна ВП залежить від похибок вимірювання температури ТП в діапазоні відносних похибок від 0,01 до 1,0%.

Наведені результати дозволяють зробити висновок, що для підвищення точності ВВ є доцільним використання таких алгоритмічних процедур: апроксимація результатів вимірів методом найменших квадратів та штучні НМ. Для підвищення швидкодії ТАВ слід внести до його складу спеціалізований НП, який дозволить компенсувати випадкові та ДНП вимірювання використанням штучних НМ.

3.8 Перевірка чутливості термоанемометричного витратоміра засобами комп'ютерного моделювання теплового потоку

Важливою властивістю будь-якого вимірювального приладу є його чутливість, яка визначається відношенням зміни вихідного сигналу до зміни вимірюваної величини, що його викликає. Визначення факторів, що чинить вплив на чутливість ТАВ за різних витрат різних БП, та усунення їх впливу потрібно для зменшення похибок ВВ БП.

Чутливість ТАВ залежить від значень температур для певної постійної витрати БП між двома сусідними ТП, встановленими в потоці БП (ТП *y* (точка *A*) біля НЕ, ТП *y+1* (точка *E*) – на відстані *L*) (рис. 3.27).

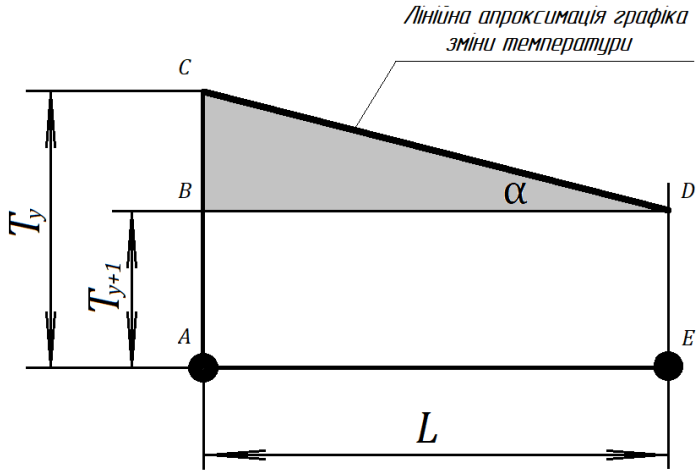


Рисунок 3.27 – Зміна температури між ТП (об'ємна ВП *Q* = const): T_y – температура, що реєструється ТП в точці *A*; T_{y+1} – температура, що реєструється ТП в точці *E*

Авторська розробка.

Рисунок 3.27 показує, що в процесі руху БП від ТП *y* до ТП *y+1* його температура знижується:

$$\Delta T = T_y - T_{y+1} \tag{3.28}$$

В такому випадку для досить малих *L* різниця температур ΔT зменшується. Тому в процесі конструювання ТАВ відстань *L* потрібно вибирати з урахуванням швидкості потоку БП, щоб була можливість виміряти ΔT із заданою точністю. Для дуже малих *L* та змінних ВП температури палива в точках *A* та *E* можна вважати близькими за значеннями.

Внутрішня енергія палива для відстані *L* пропорційна площі трикутника BCD, яка так само пропорційна ΔT:

$$\Delta T = Ltg\alpha \tag{3.29}$$

Треба зазначити, що більша площа *BCD* для відстані *L* сприяє збільшенню значень чутливості ТАВ для цієї ділянки між ТП. Отже, більша точність ВВ БП для заданих значень *L* досягається на ділянках з найбільшими Δ*T* між сусідніми ТП, що зареєстровано.

У разі збільшення витрати БП температура, що реєструється перетворювачем T_{y+1}, буде більшою внаслідок зменшення часу на відведення тепла від БП (рис. 3.28).

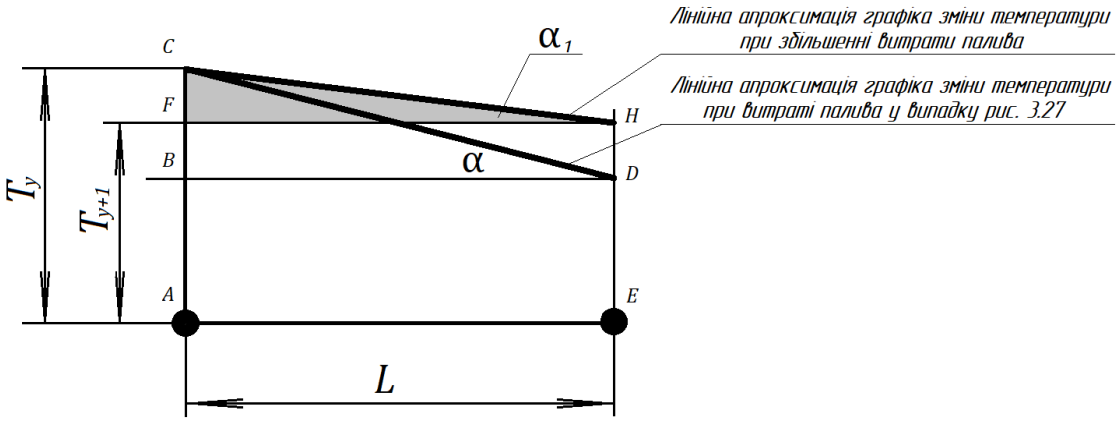


Рисунок 3.28 – Зміна температури між сусідніми ТП ТАВ (ВП *Q* зростає)

Авторська розробка.

Рисунок 3.28 показує, що $\alpha_1 < \alpha$ і площа трикутника *FCH* менша площі *BCD*. Водночас Δ*T* зменшується, а це призводить до зменшення чутливості витратоміра на ділянці між ТП. Зменшення чутливості призводить до збільшення ПВ витрат БП. Подальше збільшення витрати БП призводить до зменшення кута α_1, може бути зареєстровано випадок Δ*T* = 0, тобто чутливість витратоміра на ділянці буде наближатись до нуля. При зменшенні витрати БП температура, що її реєструє ТП T_{y+1}, буде зменшуватись, чому сприяє збільшення часу на відведення тепла від БП (рис. 3.29).

В цьому випадку $\alpha_1 > \alpha$, площа трикутника *FCH* більша за площу *BCD*, різниця температур ΔT збільшується, чутливість ТАВ на ділянці також збільшується, що сприяє зменшенню ПВВП. Подальше зменшення ВП призводить до збільшення кута α_1, відбувається ситуація $\Delta T \rightarrow \max$, чутливість ТАВ на цій ділянці трубки максимально зростає.

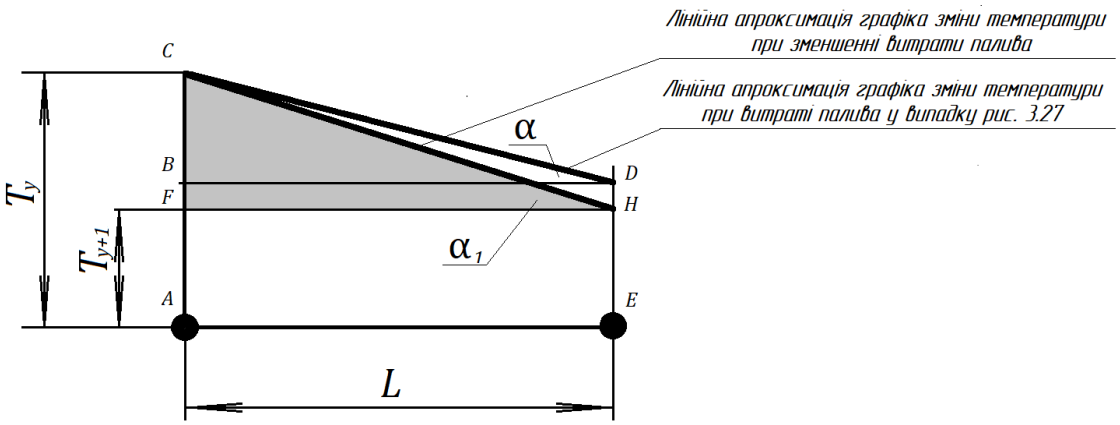


Рисунок 3.29 – Схема зміни температури між сусідніми ТП ТАВ (об’ємна ВП *Q* зменшується)

Авторська розробка.

Отже, для отримання задовільної чутливості ТАВ в широкому діапазоні витрат БП потрібно враховувати не тільки можливі швидкості потоку БП, але і відстань між ТП, які мають бути взаємопов’язаними в конструкції ТАВ. За використання декількох послідовно встановлених ТП визначити повну чутливість ТАВ можна як суму різниць температур між всіма сусідніми ТП для відомої витрати БП. Це означає, що чутливість ТАВ залежить від поточного значення витрати БП та відстані між ТП. Саме ці фактори є визначальними для забезпечення необхідного значення чутливості ТАВ.

Для збільшення діапазону ВВ БП, який має місце в АТЗ, розроблено конструкцію ТАВ у вигляді послідовно встановлених трубок з певним співвідношенням діаметрів. Це дозволяє впливати на

швидкість потоку палива в широкому діапазоні, відповідно, розширює можливий діапазон ВВ БП і впливає на точність вимірювання їх витрат.

Однак, за певних значень витрат (швидкостей руху) БП, імовірна поява його турбулентного руху, який, можливо, призведе до вирівнювання температур поля, які реєструються ТП ТАВ, що потребує додаткового дослідження, оскільки негативно вплине на точність ВВ БП.

Таке моделювання планується виконати в програмному середовищі Ansys з використанням інструментів CFD-моделювання Ansys Fluid, алгоритм роботи яких містить створення твердотільної 3D-моделі об’єкта, її розбиття на кінцеві елементи, опис початкових і межових умов. Після цього виконують перевірку незалежності сітки, підбираються параметри розбиття на кінцеві елементи. Критеріями перевірки незалежності сітки будуть вибрані температури в певних перерізах трубки ТАВ. Відомо, що чим менші розміри кінцевих елементів, тим вища точність розрахунків. Зменшення розмірів кінцевих елементів приводить до збільшення необхідної обчислювальної потужності, тому перевірка незалежності сітки зводиться до знаходження компромісу між точністю отримуваних результатів і часом виконання розрахунків, що потрібно враховувати на етапі розробки конструкції ТАВ.

Проведено моделювання розподілу температур трисекційного ТАВ з послідовно встановленими трубками з діаметрами 10, 30, 50 мм і довжиною 50 мм, відповідно. Трубки з’єднані конусами, геометричні параметри яких на цьому етапі досліджень не змінювались. Передбачалось, що величина конусності не змінює рух палива на турбулентний, що підтверджується результатами розподілів температур (рис. 3.22; 3.23).

Аналіз проведено для завідомо великих витрат 100 л/год та 200 л/год для візуального оцінювання чутливості ТАВ. Отримано графічний розподіл швидкостей і температур потоків в певних перетинах ТАВ. Температура НС приймалась 20 °С, рідини на вході 10 та 30 °С.

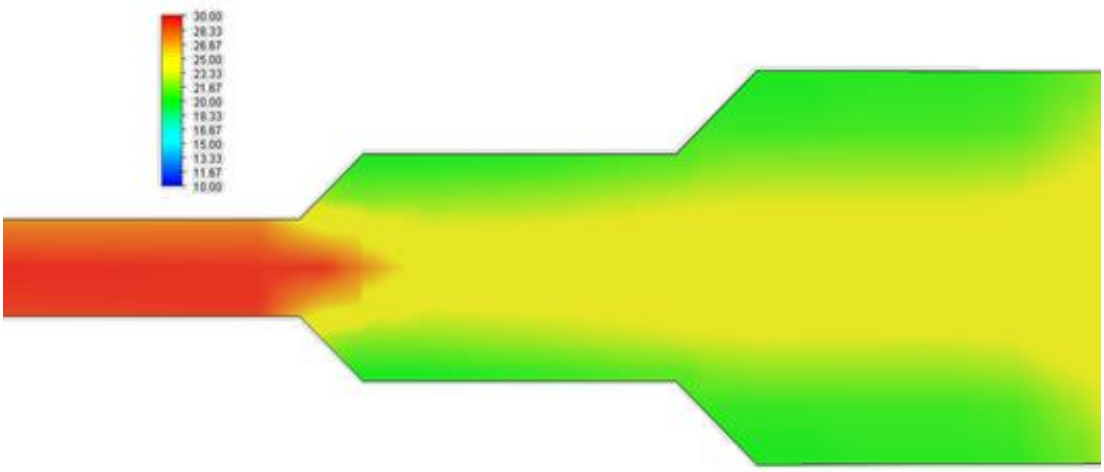


Рисунок 3.30. – Розподіл температур в трубках ТАВ (витрата 200 л/год, температура на вході 30 °С)

Авторська розробка.

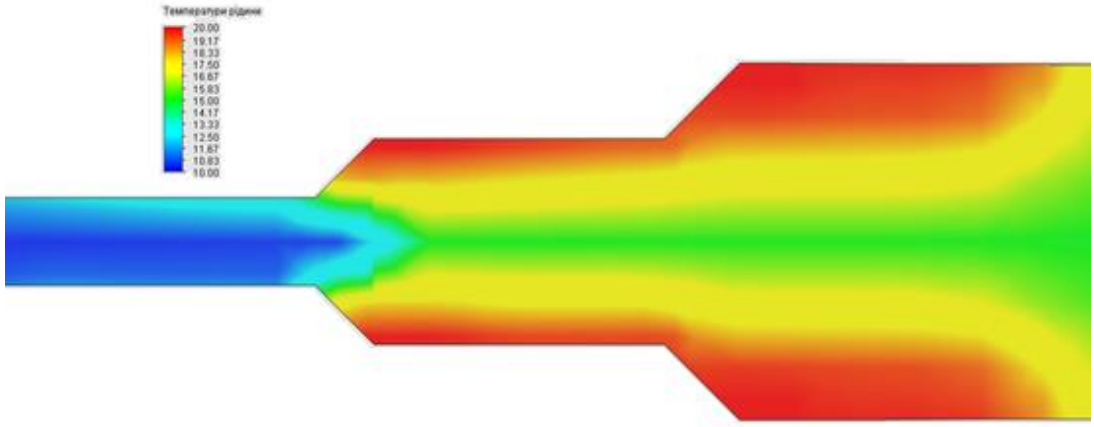


Рисунок 3.31 – Розподіл температур в трубках ТАВ (витрата 100 л/год, температура на вході 10 °С)

Авторська розробка.

Аналіз результатів графічного моделювання розподілу температур вздовж осі ТАВ показує, що для підвищення точності вимірювання температур в потоці палива ТАВ для заданої величини ВП обов'язково потрібно підбирати такі конструктивні параметри ТАВ: температура на вході в трубку (температура НЕ), довжина і діаметр трубки, кількість послідовно встановлених трубок. Також на рис. 3.30, 3.31 видно, що на розподіл температур в перерізах ТАВ впливає конусність елементів, що з'єднують трубки, оскільки біля них утворюються місцеві завихрювання, які можуть вносити додаткову похибку в процес вимірювання температурного поля і, відповідно, витрат БП.

Отримані дані показують, що розбіжність результатів, отриманих експериментально, і результатів комп'ютерного моделювання можлива внаслідок різних коефіцієнтів теплопровідності палива і його властивостей, що задаються в комп'ютерній моделі.

3.9 Удосконалення моделі передачі тепла в термоанемометричному витратомірі біопалив

ВВ БП різного походження у процесі експлуатації АТЗ –частина транспортного процесу в цілому, особливо для визначення його економічних показників. На особливу увагу заслуговують витратоміри БП.

В більшості ТАВ, що їх випускає промисловість, встановлено два ТП: один на НЕ, другий – на певній відстані від НЕ, що зменшує можливий діапазон вимірювання ВП.

Місце встановлення ТП можливе по осі ТАВ, а також на радіальній відстані від його геометричної осі. Такі рішення дозволяють розширити діапазон ВВ, підвищує чутливість ТАВ та

зменшує ПВВП, так само за рахунок зменшення похибок, що виникають на різних швидкостях руху палива.

Кількісні показники передачі тепла залежать від физичних властивостей БП та параметрів витратоміра. Це вимагає коригування процесів теплообміну між БП і НС, удосконалення конструкції ТАВ, підвищення його чутливості і зниження ПВ у всьому діапазоні витрат БП АТЗ.

Отже, виникає потреба удосконалення рівнянь передачі тепла в трубці ТАВ, підвищення точності ВВ БП урахуванням впливу їх властивостей на витрату.

Вказана потреба пов’язана з такими задачами:

- введення в рівняння РТП теплопровідності дво- і багатокомпонентного палива і подання нового коефіцієнта РТ ТАВ БП;
- аналіз чинників, що впливають на конструктивний коефіцієнт трубки ТАВ і визначення його значення для збільшення чутливості ТАВ, підвищення точності ВВ БП.

Відповідно до вищевикладеного, за умови використання тонкостінної трубки ТАВ та прийнявши $d_2/d_1 = 3/2$, конструктивний коефіцієнт трубки ТАВ буде дорівнювати:

$$K_K = \frac{2\pi}{ln\frac{3}{2}} \approx 15{,}5 \qquad (3.30)$$

Подані в роботі значення теплопровідностей БЕ, ОРП, ДП та бензину (які за властивостями близькими до РО), що є адитивною властивістю вказаних палив, дають можливість визначити теплопровідність двокомпонентних сумішевих палив (табл. 3.8).

За даними табл. 3.9 можна встановити, що коефіцієнт теплопровідності сумішевого палива на основі бензину з різною ОК БЕ визначається:

$$\lambda_{\text{Б+БЕ}} = 0{,}061k + \lambda_{\text{Б}} \tag{3.31}$$

Таблиця 3.8 – Теплопровідність двокомпонентних сумішевих палив на основі бензину

ОК БЕ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18
ОК ОРП в ДП	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18

За аналогією можна прийняти, що коефіцієнт теплопровідності палива на основі ДП залежно від ОК ОРП визначається:

$$\lambda_{\text{ДП+ОРП}} = 0{,}061k + \lambda_{\text{ДП}} \quad (3.32)$$

Конструкція трубок ТАВ передбачає використання матеріалу, з якого побудовано паливопроводи систем живлення ДВЗ, наприклад з латуні (90% Cu, 10% Zn) або сталеві. Теплопровідність цих металів порівняно з значеннями теплопровідностй аналізованих палив приблизно на два порядки є вищою за значенням. Тому можна прийняти, коефіцієнт РТ трубки витратоміра практично в усьому діапазоні можливих в експлуатації АТЗ температур буде дорівнювати теплопровідності палива.

Висновки до розділу 3

1. Проведено аналітичний огляд методів ВВ рідин та конструкцій існуючих витратомірів, розглянуто їх класифікацію, недоліки та переваги й сформульовано основні вимоги до витратомірів палив. Показано, що найбільш привабливими щодо використання для АТЗ є ТАВ, але і вони потребують удосконалення та адаптації для ВВ БП на АТ.

2. Проаналізовано існуючу математичну модель температурного поля в потоці БП, що проходить через ТАВ. Розроблено математичну модель визначення РТП в трубці ТАВ з циліндричною стінкою (лінійна густина теплового потоку), в яку введено нові категорії, а саме: конструктивний коефіцієнт та коефіцієнт РТ трубки ТАВ. Проаналізовано їх вплив на величину РТП. Показано шляхи підвищення чутливості ТАВ, підвищення точності ВВ БП, що полягають у взаємному врахуванні конструктивних параметрів ТАВ та властивостей БП.

3. Експериментально доведено, що час виходу ТАВ на РТР для різних струмів, що проходять через НЕ, та різних концентрацій РО в ДП

залежно від вмісту РО в ДП, змінюється в 9,3 раза, що необхідно враховувати в алгоритмі роботи ТАВ для підвищення точності ВВ БП.

4. Для підвищення точності ВВ БП ТАВ обгрунтовано необхідність врахування теплопровідності палива та матеріалу трубки ТАВ, зменшення діаметра НЕ та збільшення діаметра трубки ТАВ, а також кількість ТП в потоці різних БП. Отримано залежності відношення діаметра трубки до діаметра НЕ ТАВ для матеріалів трубки різної теплопровідності, використання яких дозволяє зменшити вплив РТП на осьовий, що дасть зменшення ПВ витрат БП.

5. Проведено моделювання теплового балансу НЕ в рухомому потоці БП для ідентифікації основних параметрів математичної моделі, від яких залежить точність і швидкодія ТАВ. Аналіз результатів показав, що для підвищення точності ВВ БП ТАВ потрібно одночасно вимірювати температуру палива у відповідних точках потоку. Отримано графічне подання розподілу температур в потоці різних палив для різних їх швидкостей руху (витрат).

6. Отримано нову математичну модель розподілу температурного поля вздовж трубки витратоміра та вираховано уточнене значення витрати БП. Запропоновано методи підвищення точності та швидкодії теплового витратоміра на основі використання сучасних спеціалізованих НП, які дозволяють компенсувати вплив випадкових і ДНП вимірювання витрат БП.

7. Отримано залежності температур БП по осі трубки ТВ з урахуванням їх витрат від відстані до НЕ. Встановлено, що з метою підвищення точності вимірювань та чутливості ТАВ для різних витрат БП він має мати такі геометричні параметри: відношення внутрішнього діаметра трубки до діаметра НЕ $d_2/d_1 = 3/2$. Вимірювання ВП доцільні на відстані 1, …, 7 см від НЕ вздовж осі витратоміра для АТЗ, що працюють на БП з відносно невеликими значеннями динамічної в’язкості.

8. Проведено моделювання теплового потоку в трубці ТАВ та отримано залежності температур від відстані до НЕ по осі трубки ТАВ для різного вмісту ОРП в ДП в діапазоні витрат 5–25 л/год. Отримано залежності температур ДП, ОРП та різних ОК ОРП в ДП по осі трубки ТАВ, на основі яких можливо визначати витрати вказаних БП.

9. Наведено результати комп'ютерного моделювання теплового потоку в ТАВ з послідовно встановленими трубками довжиною 5 см діаметрами 10, 30, 50 см, відповідно. Моделювання проведено для витрат 100 л/год та 200 л/год. Отримано графічний розподіл швидкостей і температур потоків в певних перерізах теплового витратоміра за умов: температура НС 20 °С, температура рідини на вході 10 та 30 °С.

РОЗДІЛ 4
МАКЕТНИЙ ЗРАЗОК, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНОГО ВИТРАТОМІРА БІОПАЛИВ

4.1 Конструкція термоанемометричного витратоміра біопалив для засобів автомобільного транспорту

Для вимірювання ВП на АТ, особливо у разі використання БП, перспективними вважаються ТАВ [10, 14, 18, 25]. Вони мають цілу низку переваг порівняно, наприклад, з роторними, поршневими, мембранними тощо. Наприклад, якщо використовувати ультразвукові витратоміри, існує проблема втрати бажаної точності вимірювання малих витрат, що мають місце у разі експлуатації ДВЗ АТЗ на режимах малих навантажень. Вважається, що в цьому випадку точність визначення малих витрат можна підвищити використанням більшого числа чутливих елементів, наприклад, термопар (рис. 4.1.).

В ТАВ, як правило, за нагрівача використовують ніхромовую спіраль. Потрібно розуміти, що максимально допустима температура нагріву палив у витратомірі залежить від його ФХВ. Потребує обгрунтування значення максимальної температури нагріву палива, особливо у разі малих їх витрат, що може привести до перегріву і самозаймання палива, витрата якого вимірюється.

Оскільки витратоміри, в основу яких покладено принцип передачі теплоти, є досить перспективними для використання на транспорті, виникає низка задач, що потребують наукового підходу і вирішення:

- розробити і виготовити діючий макет апаратної частини комплексу з ТАВ;

- налаштувати апаратну частину програмно-апаратного комплексу, до складу якого входить ТАВ для ВВ БП (зокрема узгодити роботу засобів передачі і обробки сигналів, провести налагодження роботи і калібрування вимірювальних мостів витратоміра);
- отримати залежності вихідного сигналу вимірювальних мостів витратоміра від температури, що реєструють чутливі елементи;
- перевірити експериментально роботу ТАВ і оцінити ПВВП в реальних умовах експлуатації автомобіля.

4.1.1 Вибір типу термоперетворювача термоанемометричного витратоміра

Оскільки в ТАВ, що розробляється, передбачено використання електричного ТП з розташуванням його в потоці палива, витрата якого вимірюється, можливим є використання таких видів ТП:
- термопара (термоелектричний перетворювач);
- позистор та критезистор;
- терморезистор.
- термістор.

Всі вони мають свої переваги та недоліки і не завжди можуть бути рекомендовані для використання в ТАВ, призначених для роботи на транспортних ДВЗ.

Принцип дії термопари полягає в тому, що у процесі з'єднання двох провідників (напівпровідників) обома кінцями та розташування місць з'єднань в різних температурних полях з температурами T_0 і T_1 (рис. 4.1) в їх колі виникає ЕРС E_{AB}, що називається термо-ЕРС:

$$E_{AB} = f(T_0, T_1) \tag{4.1}$$

Величина ЕРС залежить не тільки від температур T_0 і T_1, але і від матеріалів провідників (напівпровідників).

Відповідно коло, що його утворюють ці провідники (напівпровідники), називають термопарою (термоелектричним перетворювачем), а місце з'єднання – спаєм. Один зі спаїв називають робочим (чутливим) і розміщують в зоні вимірювання температури T_1, а другий (опорний спай) – розміщують в зоні постійної температури T_0. При невеликих різницях T_0 і T_1 ЕРС практично пропорційна їх різниці ΔT:

$$E_{AB} \approx \Delta T \tag{4.2}$$

Також відомо, що величина ЕРС не залежить від розподілу температур по провідниках, тому електричне коло (рис. 4.1) може бути розірвано, наприклад, для під'єднання вимірювального приладу. Якщо опорний спай знаходиться в полі постійної температури (T_0 = const), величина ЕРС для таких матеріалів провідників (напівпровідників) залежить тільки від T_1, що значно спрощує аналіз показів термопари.

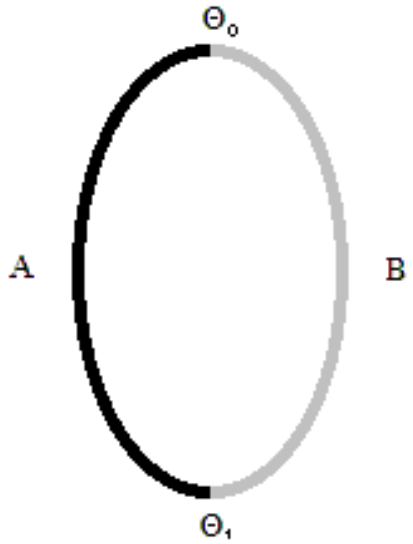


Рисунок 4.1.– Замкнена термопара

Авторська розробка.

Залежно від потрібного температурного діапазону роботи ТАВ можна вибирати різні матеріали для термопар. В табл. 4.1 наведено термо-ЕРС, що утворюють відомі матеріали в парі з платиною *Pt* при температурі робочого (чутливого) спаю 100 °С і при температурі опорного спаю 0 °С.

Таблиця 4.1 – Термо-ЕРС для деяких матеріалів в спаї з платиною *Pt* [157]

Матеріал, речовина	Хімічне позначення	Величина термо-ЕРС, мВ	Примітка
Кремній	Si	+ 44,8	
Сурма	Sb	+ 4,7	
Хромель	Ni+Cr	+ 2,4	Сплав нікелю 87–91% і хрому 8,7–10 % з домішками кремнію, міді, марганцю, кобальту
Ніхром	Ni+Cr	+ 2,2	Сплав нікелю 55–78% і хрому 15–23% з домішками заліза, марганцю, кремнію, алюмінію
Залізо	Fe	+ 1,8	
Молібден	Mo	+ 1,2	
Паладій	Pd	- 0,57	
Нікель	Ni	- 1,5	
Пірит	FeS_2	- 12,1	Мінерал
Молібденіт	MoS_2	- 69 … - 104	Мінерал

Аналіз табл. 4.1 показує, що в практиці використання термопари як термоперетворювача ТАВ можна отримати сигнал від декілька одиниць до десятків мВ. Промисловість пропонує термопари з різними властивостями стосовно діапазону вимірювання температур, деякі з них наведено в табл. 4.2.

З табл. 4.2 можна зробити висновок, що з наведених термопар для використання в ТАВ для ВВ БП найкраще підходять термопари «мідь-копель», що мають найбільш наближений температурний діапазон експлуатації транспортних ДВЗ. Вибір термопар з більш широким температурним діапазоном призведе до збільшення похибок ВВ БП.

Таблиця 4.2 – Термопари, що виготовляє промисловість [163]

Матеріал термоелектродів за СТ СЕВ1059-78	Позначення типу	Діапазон вимірювань, °С
Мідь-константан	-	-270 … +100
Мідь-копель	-	-200 … +100
Мідь-міднонікелевий	-	-200 … +400
Залізо-міднонікелевий	I	-200 … +700
Хромель-міднонікелевий	E	-100 … +700
Хромель-алюмель	K	-200 … +1000

Існують матеріали, у яких провідність змінюється в невеликому діапазоні температур, близькому до температури фазового переходу матеріалу. Резистори з великим значенням температурного коефіцієнта опору в зоні критичної температури називають критезистори. Напівпровідникові терморезистори з позитивним температурним коефіцієнтом опору називають позистори.

Позистори та критезистори використовують для вимірювання температур в дуже вузькому діапазоні в околі критичної температури,

тому їх використання в ТАВ для вимірювання ВП практично не виправдано.

Для високоточних вимірювань температур використовують термочутливі п’єзорезонатори, піроелектричні перетворювачі, сегнетокерамічні ємнісні перетворювачі.

Для вимірювань температур в межах -80 … +150 °С є логічним використовувати недорогі термодіоди та термотранзистори, верхня межа температур яких обмежена тепловим пробоєм p-n-переходу. Нижня межа температури пов’язана зі зменшенням кількості основних носіїв. Температурний діапазон цих приладів достатній для використання в ТАВ палив транспортних ДВЗ. До їх важливих переваг відносять: малі габарити, доступність, взаємозамінність, низьку вартість. В процесі вимірювань використовують залежність прямого та зворотного струму p-n-переходу, або залежність спаду напруги на відкритому p-n-переході від температури. Водночас температурна чутливість p-n-переходу за напругою може бути до 10 мВ/К, що є суттєвою перевагою порівняно з термопарами. Фактично будь-який напівпровідниковий діод або транзистор може використовуватись як термоперетворювач в ТАВ, така властивість була використана для перевірки працездатності ТАВ.

Для використання як чутливий елемент в ТАВ можна також розглядати терморезистори – це ТП, опір яких залежить від температури. Використовують металеві провідникові та напівпровіднікові резистори. Провідникові відомі під назвою термометри опору або резистивні детектори температури, а напівпровідникові ще називають термісторами (рис. 4.2).

Такий термістор забезпечує вимірювання температур в діапазоні від -20 до +105 °С з точністю ±1 °С, корпус виконано з нержавіючої сталі, опір 10 кОм при 25 °С, потужність 5 мВт/°С, розмір 5×30 мм, механічна стійкість 9,81 Н протягом 1 хв без деформації.

Рисунок 4.2 – NTC термістор 10 кОм 1% 3950 в герметичному корпусі [155]

Для виготовлення терморезисторів використовують матеріали зі стабільним температурним коефіцієнтом опору T_R, який залежить від хімічної чистоти матеріалу, з якого їх виготовляють, %/град [156, 157]:

$$T_R = \frac{\Delta R}{\Delta T R_{20\,^\circ C}} 100\%, \tag{4.3}$$

де ΔR – зміна опору терморезистора, що має місце внаслідок малої зміни температури НС ΔT (розглядається відносно відомої визначеної температури);

$R_{20\,^\circ C}$ – опір терморезистора при 20 °С.

Метали мають позитивний T_R, коли опір зростає з підвищенням температури. Терморезистори з такою властивістю називають позисторами. Деякі сплави мають негативний температурний коефіцієнт опору. Для більшості терморезисторів температурна залежність опору (зміна опору в робочому діапазоні температур) описується залежністю [155]:

$$R_{T_2} = R_{T_1} exp\left[\frac{B(T_1 - T_2)}{T_1 T_2}\right], \tag{4.4}$$

де R_{T1} і R_{T2} – опір терморезистора при температурах T_1 і T_2, Ом;

B – постійна терморезистора.

Найчастіше термометри опору виготовляють у вигляді дроту або плівки з платини, міді, вольфраму, нікелю. Вибір матеріалу пов'язаний також з агресивністю палива, витрата якого вимірюється. Термометри опору з міді використовують до температур 200 °С, оскільки при більш високих температурах мідь швидше окислюється. Термометри опору з платини мають діапазон використання -200 … +650 °С. Найвищий температурний коефіцієнт опору має нікель, тому нікелеві термометри опору мають велику чутливість. Характеристики деяких матеріалів, що їх використовують для виготовлення термометрів опору наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Характеристики деяких матеріалів термометрів опору [155]

Матеріал	Температурний коефіцієнт опору в діапазоні 0 … 100 °С	Питомий опір при 20 °С, Ом·мм^2/м	Термо-ЕРС в парі з міддю (0 …500 °С), мкВ/К
Платина	0,0039	0,105	7,5
Мідь	0,00427	0,017	-
Вольфрам	0,0048	0,055	0,5
Нікель	0,0069	0,08	22,5

Термометри опору дозволяють отримати точність 0,001 °С (наприклад платинові), але їх низька чутливість і висока інерційність (від декількох секунд до декількох хвилин) не дає можливості їх використовувати для вимірювання ВП транспортних ДВЗ.

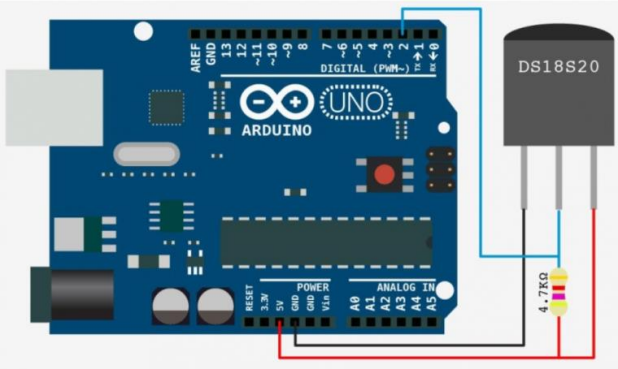


Рисунок 4.3 – Схема під’єднання датчика DS18B20 до контролера Arduino Uno [176]

Сьогодні промисловість пропонує більш сучасні датчики температур різних типів. Наприклад, датчик Dallas DS18B20, зчитуваний з якого цифровий код є прямим безпосереднім кодом виміряного значення температури і не потребує додаткових перетворень. В датчик вбудовано програмований користувачем АЦП зі змінною роздільною здатністю в діапазоні від 9 до 12 розрядів вихідного коду. Абсолютна похибка перетворення менше 0,5 °С в діапазоні вимірюваних температур від -10 до +85 °С (повний діапазон вимірюваних температур від -55 до +125 °С). Максимальний час повного дванадцятирозрядного перетворення складає 750 мс (за роздільної здатності 12 розрядів). Схема під’єднання потребує резистора 4.7 кОм (рис. 4.4).

Енергонезалежна пам’ять температурних установок забезпечує запис їх верхньої та нижньої меж. Мікросхема також містить механізм пріоритету сигналу в лінію про «вихід» температури за одне зі встановлених значень. Блок 1-Wire-інтерфейсу мікросхеми дає можливість адресації кількох пристроїв на однопровідній лінії, що значно покращує її використання.

Датчик має особистий 64-розрядний груповий код 028Н та можливість роботи без зовнішнього ДЖ, що досягається паразитним

живленням з однопровідної лінії. Також можливе живлення датчика від окремого джерела напругою 3 … 5,5 В.

Як термоперетворювачі в ТАВ запропоновано до використання термістори марки NTC (Negative Temperature Coefficient) 2K2 1% 50 мВт (ДСТУ 2815-94). Вони являють собою напівпровідниковий резистор, на опір якого впливає зміна температур. Відповідно до DIN 44070 або IEC 60593 значення опору зі зростанням температури зменшується (рис. 4.4).

Зміна опору відбувається внаслідок зміни зовнішньої температури або за самонагріванням надмірним струмом вимірювання. Врахування цього факту є важливим для правильної роботи термістора. Моніторинг заданої температури визначений номінальною температурою спрацьовування, і опір термістора має нелінійну характеристику, що потрібно враховувати в конструкції ТАВ.

NTC-термістори частіше використовують для контролю змін його опору в досить широкому діапазоні температур. Характеристика термістора нелінійна порівняно, наприклад, з платиновими датчиками Pt100 (рис. 4.4).

Термістори NTC поділяють на групи залежно від задач, що їх потрібно вирішити:

- *бісерні* (свинцевий дріт із платиновим сплавом, спечений в керамічний корпус). Переваги: швидкодія, стабільність, робота за високих температур;
- *дискові* та *чіпові* термістори. Переваги: висока константа розсіювання, розраховані на великі струми.
- у скляній оболонці (герметизовані в повітронепроникній скляній бульбашці). Переваги: робота за температур понад 150 °С, монтаж на друкованій платі, захист від впливу НС.

Термістори NTC, як правило, використовують в діапазоні температур -55 … 200 °C, в якому вони мають кращу точність показів. Температурна чутливість датчика виражається як «відсоткова зміна на один °C». Залежно від матеріалів і використання типові значення чутливості до температури варіюються від -2 … -6% на 1 °C.

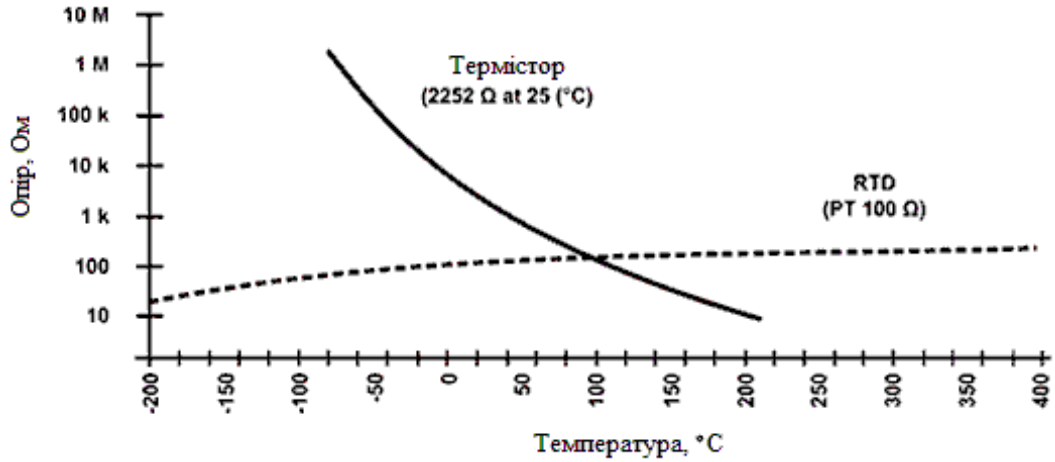


Рисунок 4.4 – Залежність опору термістора від температури [155, 156]

Таким чином, використання термісторів NTC як ТП в ТАВ БП дає певні переваги та дозволяє запропоновувати конструкцію витратоміра з їх використанням.

4.1.2 Властивості матеріалів, що використовуються для виготовлення термоанемометричних витратомірів

Корпуси ТАВ виготовляють, як правило, з металів, зокрема і кольорових, та їх сплавів, теплопровідність яких треба враховувати у процесі розробки конструкції витратоміра, оскільки вона суттєво впливає на результати вимірювань. НЕ можуть бути різної конструкції, найбільш розповсюджені виготовляють з дроту високого опору, наприклад ніхрому, властивості якого також потрібно враховувати, розробляючи конструкції витратоміра.

4.2 Конструктивні рішення і макетний зразок витратоміра. Налаштування та калібрування

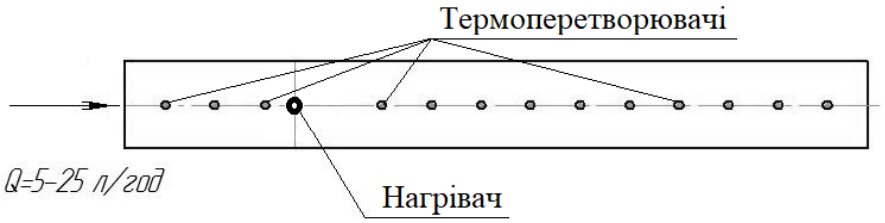
Термоперетворювачі в ТАВ, що його розроблено, зібрано за мостовою схемою. Калібрування вимірювальних мостів потрібно провести для визначення в певних умовах метрологічних характеристик витратоміра, а також потреба проведення калібрування та перевірки можливості його застосування в АТЗ. Таке калібрування проведено з використанням об'ємного способу визначення витрат.

На рис. 4.5 показано схему ТАВ, макетний зразок ТАВ, виготовлену плату вимірювальних мостів для 13 ТП: два ТП встановлено перед НЕ, один ТП – максимально близько до НЕ та 10 ТП після НЕ. Як ТП використано термістори NTC 2K2 1% 50 мВт (табл. 4.4).

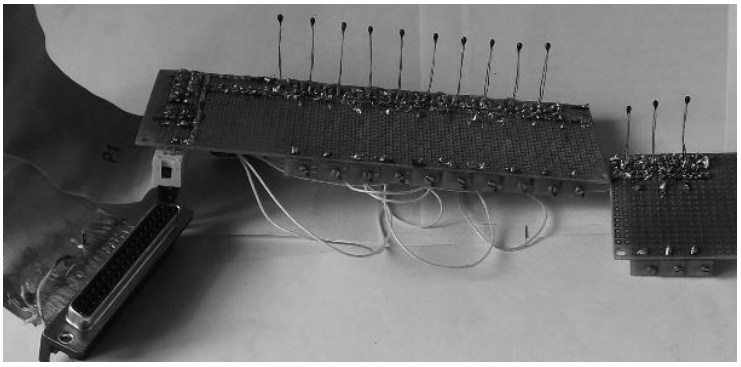
В одне плече вимірювального мосту (рис. 4.6) внесено резистор R_1 і термістор R_3, в друге плече резистори R_2 та R_4. Мостова схема ввімкнення дозволяє уникнути впливу коливань вхідної напруги на розбалансування вимірювального мосту. Балансування вимірювального мосту відбувається за допомогою прецизійного резистора змінного опору R_4 СП5-14А 2,2 кОм ± 5%. Резистори СП5-14А змінні, дротяні, регулювальні і використовуються для навісного монтажу. Вони одинарні, однооборотні, вибростійкі і призначені для роботи в електричних колах постійного і змінного струмів. Вказані властивості повністю відповідають вимогам та умовам роботи автомобілів.

Кількість тепла, що віддає НЕ в потік БП, залежить від його фізичних характеристик, геометрії та орієнтації НЕ відносно потоку палива. Зі збільшенням температури НЕ чутливість всього приладу має збільшуватися. Постійний струм, що протікає в колі ТП, залишається незмінним при різних швидкостях потоку рідини.

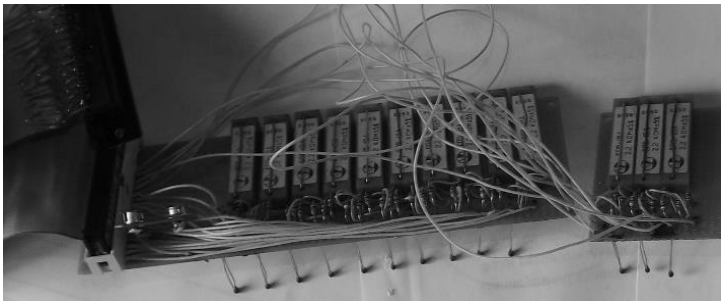
Живлення вимірювального мосту здійснюється за допомогою джерела з великим внутрішнім опором, що забезпечує сталість величини струму у процесі вимірюванні опору ТП.



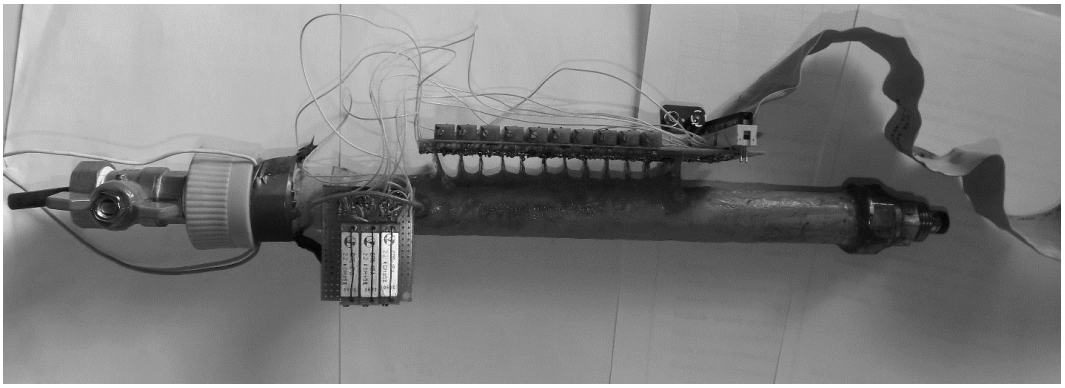
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.5 – розроблений ТАВ: а) – схема ТАВ; б) – плата вимірювальних мостів з термісторами NTC 2K2 1% 50 мВт (ДСТУ

2815-94); в) – балансувальні резистори вимірювальних мостів з ТП; г) – макетний зразок витратоміра в зборі

Авторська розробка.

Таблиця 4.4 – Характеристики термістора NTC 2K2 % 50 мВт (ДСТУ 2815-94)

Показник	Розмірність	Значення
Характеристика	-	NTC
Призначення		Датчик температури
Максимальний діаметр	мм	2,5
Номінальний опір	Ом	2,2
Нормований допуск	%	± 1%
Потужність, що розсіюється	Вт	0,05
Робоча температура	°C	-40 … +125
Спосіб монтажу		Паяння

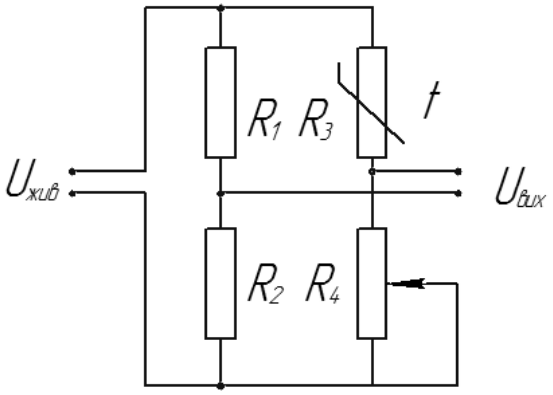


Рисунок 4.6 – Схема вимірювального моста

Вимірювальні мости приєднується до аналого-цифрового перетворювача (АЦП) через аналоговий порт DRB-37M. АЦП L-Card

E14-440, дає можливість одночасно аналізувати сигнали з 16-ох каналів (рис. 4.7). Дискретизація вимірюваної АЦП напруги складає $0{,}1 \cdot 10^{-3}$ В. Так само АЦП через USB-порт приєднується до ЕОМ. Запис масиву даних «напруга-час» здійснюється з використанням програмних комплексів LGraph2 та PowerGraph, що дає змогу в подальшому отримати залежності вигляду «температура-час».

Незважаючи на низку переваг (мала інерційність, висока чутливість, достатня точність, надійність, компактність тощо), ТАВ має істотний недолік – залежність показів ТП від температури НС. Це зумовлює потребу вимірювання температури середовища в додатковому каналі, що ускладнює схему приладу, але підвищує точність вимірювання, що досягається встановленням ТП перед НЕ ТАВ.

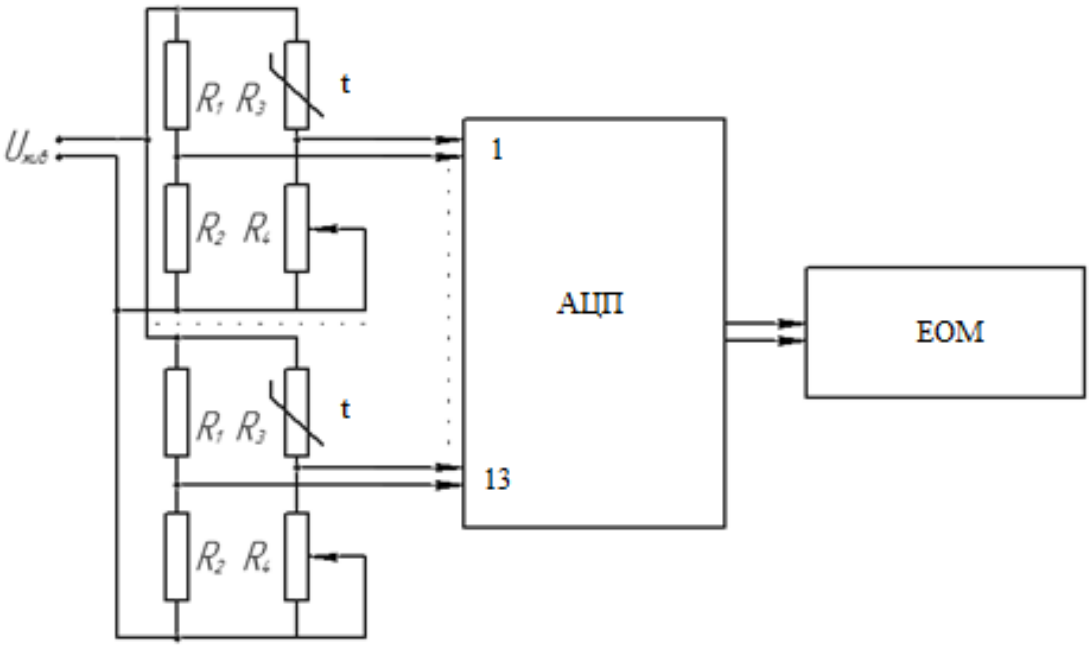


Рисунок 4.7 – Схема обробки сигналів з вимірювальних мостів

Калібрування термісторів, які використовуються як ТП, виконувалося в робочому діапазоні температур палив. Експериментальна установка для калібрування і налаштування ТАВ містить ЕОМ 1, бак 2, кран 3 регулювання витрати, АЦП 4, трубку

ТАВ 5 з встановленими НЕ і ТП, блок живлення 6 НЕ і ТП, мірний циліндр 7 (рис. 4.8). Як ТП пропонуються термістори NTC 2K2 1% 50 мВт ДСТУ 2815-94. Виходи ТАВ приєднується до АЦП 4 через аналоговий порт DRB-37M АЦП L-Card E14-440. Це дає можливість одночасного отримання сигналів з 16-ти каналів, що опитуються. Дискретизація напруги, що вимірюється АЦП, становила $0{,}1 \cdot 10^{-3}$ В. Так само АЦП через USB-порт приєднується до ЕОМ.

Вимірювальні мости балансувалися за температури 20 °С. Для налаштування вимірювальних мостів використовувалися ртутний термометр (ГОСТ 2823-73) та резервуар з водою. Попередньо було проведено градуювання вимірювальних мостів для кожного каналу в діапазоні температур 20 … 96 °С та отримано залежність напруги від температури з кроком 2 °С.

Обробка інформації виконувалась за допомогою програмних комплексів LGraph2 і PowerGraph [17], що дає можливість записати масив даних «напруга-час» і після подати його у вигляді залежності «температура-час».

Для оцінювання та порівняння показників роботи ТАВ була досліджена його комп’ютерна модель засобами CFD-комплексу COSMOSFloWorks.

Тарування та отримання залежностей «температура-напруга», розподіл температур залежно від витрати рідини і відстані від НЕ отримано для бензину та ДП (рис. 4.9, 4.10). Для використання палив з іншими ФХВ ці залежності потребують коригування щодо конкретного виду палива, для якого налаштовується та тарується ТАВ. Оскільки ТП в цій конструкції ТАВ розташовано по осі через кожні 1 см, відстань від НЕ до кожного ТП відповідає його порядковому номеру. Калібрування проводилось для діапазону витрат 1,81; …; 24,17 л/год.

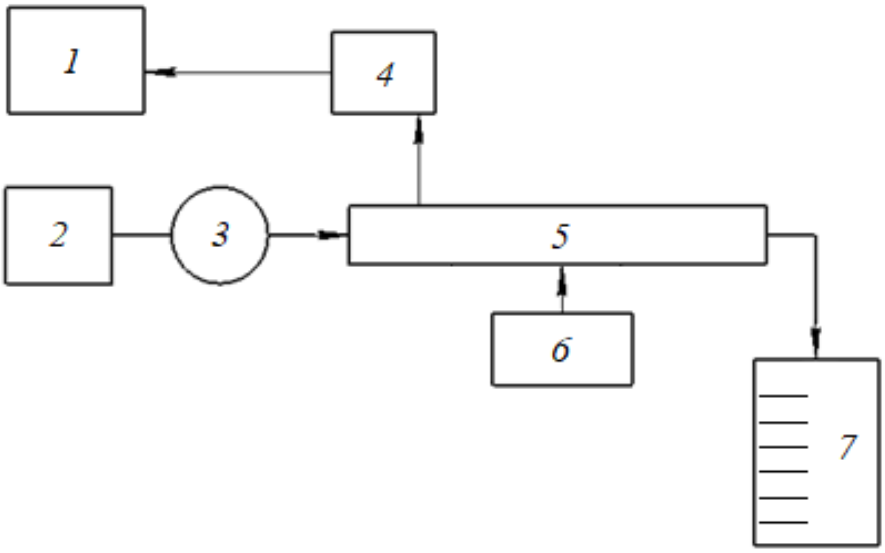


Рисунок 4.8 – Схема установки для налаштування та калібрування ТАВ: 1 – ЕОМ; 2 – бак; 3 – кран регулювання витрати; 4 – АЦП; 5 – трубка витратоміра; 6 – блок живлення НЕ і вимірювальних мостів ТП; 7 – мірний циліндр

Авторська розробка.

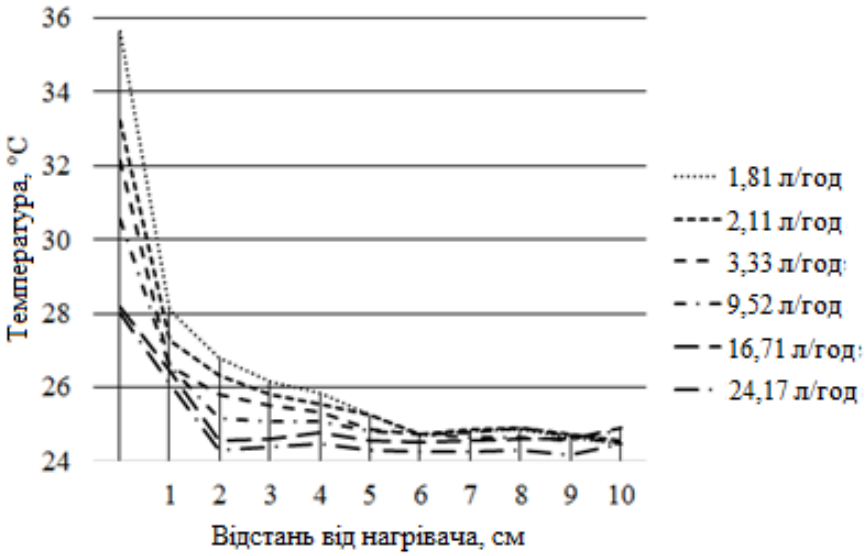


Рисунок 4.9 – Зміна температури від відстані до НЕ при заданих витратах бензину

Авторська розробка.

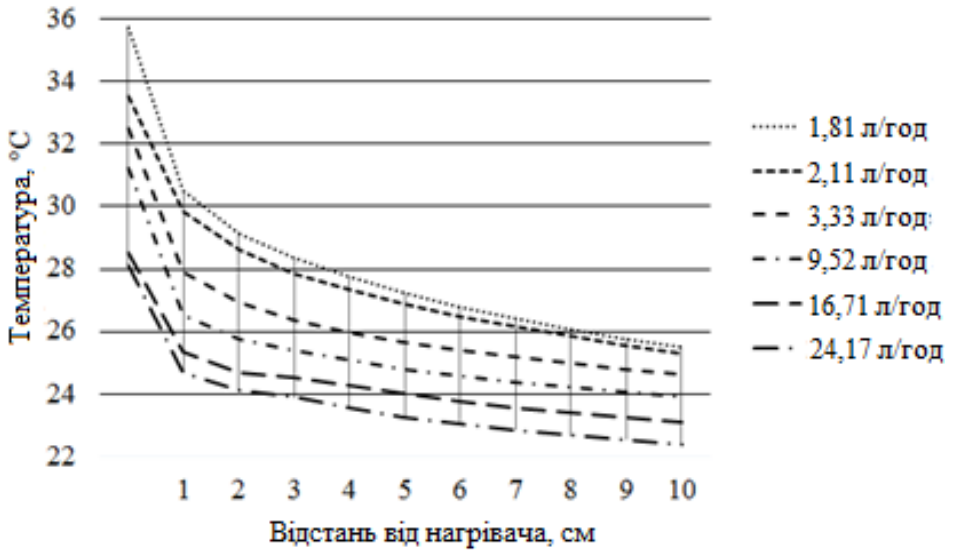


Рисунок 4.10 – Зміна температури від відстані до НЕ при заданих витратах ДП

Авторська розробка.

4.3 Експериментальне визначення витрати палива автомобіля за допомогою термоанемометричного витратоміра

Для перевірки розроблених теоретичних положень виготовлено макетний зразок ТАВ, проведено його налаштування, калібрування та проведено низку експериментальних досліджень щодо його роботи безпосередньо на маршруті руху АТЗ.

4.3.1 Вимірювання витрати палива на маршруті руху автомобіля

Метою згаданих експериментальних досліджень є перевірка експлуатаційних можливостей ТАВ, його працездатності в реальних умовах руху АТЗ, визначення ВП на маршруті за допомогою ТАВ, що розроблений, та порівняння її з ВП, виміряної об’ємним способом, оцінювання відносної ПВВП за двома вказаними способами.

Щодо вказаної мети дослідження, то вирішувались такі задачі:

- встановити на автомобіль та налаштувати ТАВ для вимірювання ВП безпосередньо на маршруті руху автомобіля;

- визначити ВП на маршруті руху автомобіля за допомогою ТАВ та об’ємним способом, оцінити відносну ПВ;
- зробити висновок про можливість використання розробленого ТАВ для АТЗ.

Апаратна частина витратоміра складається з трубки, що встановлюються на прямій магістралі системи живлення ДВЗ. В трубці аксіально встановлено ніхромовий НЕ (Х20Н80) довжиною 38 мм. Як ТП вибрано термістори NTC 2K2 1% 50 мВт (ДСТУ 2815-94) в кількості 10 штук, розташованих в потоці палива вздовж осі з кроком 10 мм від НЕ.

Дослідження проводилися на автомобілі марки Citroen Berlingo з дизельним двигуном об’ємом 1,9 л, 2006 року випуску і з пробігом ≈180 тис. км. Попередньо автомобілю було проведено повний комплекс робіт технічного обслуговування № 2.

Штатна подача палива з баку автомобіля була заблокована (рис. 4.11). Паливо відбиралось з мірної ємності. Штатна зворотна магістраль зливання палива в бак автомобіля системи живлення ДВЗ в процесі досліджень також не використовувалась, паливо, що мало б повертатись в бак автомобіля, також збиралось в мірну ємність. За наявності палива в двох мірних ємностях до початку руху автомобіля на маршруті і після заїзду визначалась його об’ємна витрата, яка порівнювалась з витратою, що визначена за допомогою ТАВ.

Схема під’єднання ТАВ до системи живлення автомобіля зображена на рис. 4.12., яка містить трубку 1 ТАВ, засоби живлення НЕ і вимірювальних мостів (умовно не показані), мірні ємності, АЦП L-Card E14-440, ЕОМ та паливопроводи. Живлення ТАВ відбувалося від штатної електричної системи живлення автомобіля напругою 12 В, для живлення вимірювальних мостів ТАВ використано стабілізатор напруги КР142ЕН5А.

Рисунок 4.11 – Блокування штатних магістралей системи живлення двигуна

Авторська розробка.

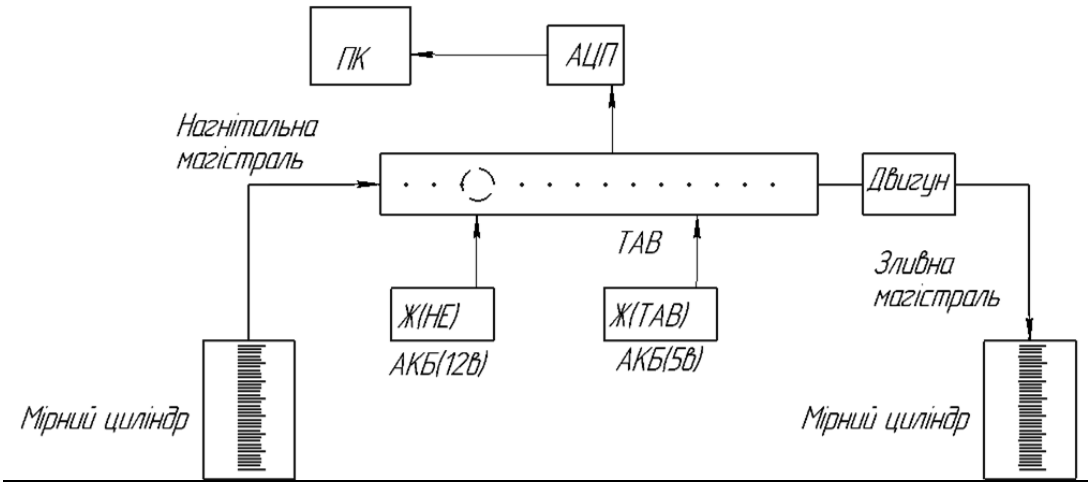


Рисунок 4.12 – Схема під’єднання ТАВ до системи живлення

Авторська розробка.

Для дослідження ВП АТЗ трубка ТАВ встановлюється на нагнітальній магістралі подачі палива ДВЗ. Обидві магістралі (нагнітальна та зливна) під’єднуються до мірних ємностей для контролю ВП об’ємним способом.

Паливо, що не використано двигуном, через зливну магістраль подається в мірний циліндр зливної магістралі. Таким чином, за різницею показів залишків палив в мірних циліндрах можна визначити об’єм палива, споживаний двигуном, та порівняти ці дані з даними, що зареєстровані ТАВ.

Витратомір встановлювався в паливну магістраль ДВЗ автомобіля (рис. 4.13), ВП якого вимірювалася. Дані від витратоміра через АЦП виводилися на ЕОМ та оброблялися програмним комплексом Registrator Viewer (рис. 4.14). ВП одночасно вимірювалась об’ємним способом.

Швидкість руху ТЗ на маршруті підтримувалась водієм за допомогою штатного спідометра та відеореєстратором (з можливістю фіксації швидкості, місцеположення, пройденого шляху та прискорень).

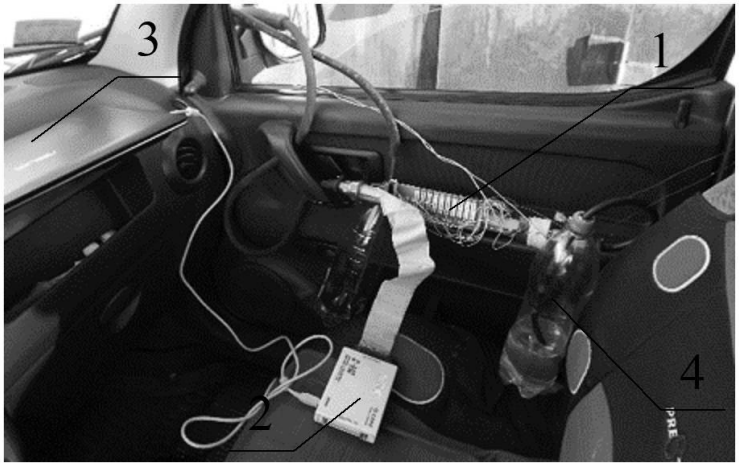


Рисунок 4.13 – Проведення експериментальних досліджень на автомобілі [46, 49, 59–61]: 1 – ТАВ; 2 – АЦП; 3 – ЕОМ; 4 – посуд з паливом

Авторська розробка.

Для проведення досліджень вибрано маршрут протяжністю 1,2 км, що має асфальтобетонне покриття. На ділянці маршруту

відтворювався рух з постійною швидкістю (контролювався водієм за спідометром автомобіля).

Дані швидкості, шляху та місцеположення отримано за допомогою програмного комплексу Registrator Viewer (рис. 4.14).

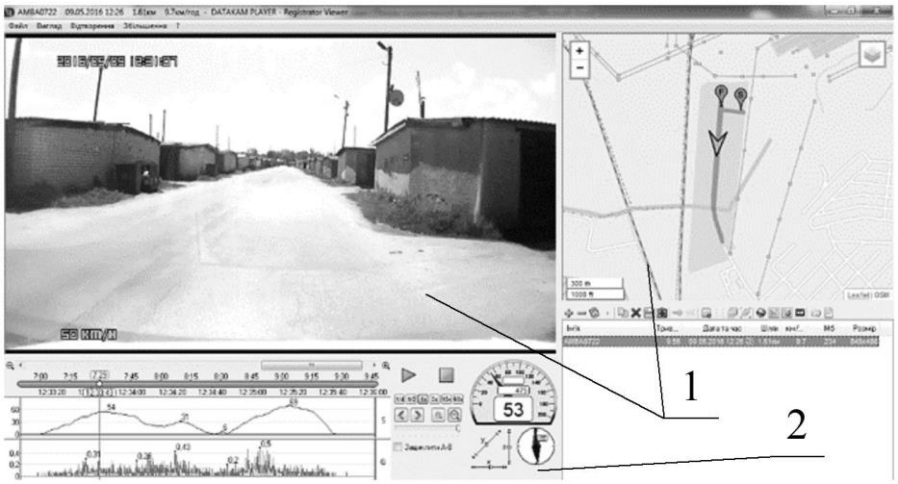


Рисунок 4.14 – Приклад роботи комплексу Registrator Viewer: 1 – маршрут руху; 2 – запис експериментальних даних

Авторська розробка.

У верхньому лівому вікні рис. 4.14 відображається: ділянка дороги, де проводилися дослідження, дата та час їх проведення, швидкість і відстань, що проїхав автомобіль від початку вимірювань. У верхньому правому вікні показано маршрут з прив’язкою до місцевості а також місцеположення автомобіля в поточний момент часу. У нижній частині наведено графіки швидкості автомобіля, миттєва та сумарна ВП, також показана миттєва швидкість автомобіля.

Проведено по десять заїздів на маршруті в прямому та зворотному напрямках. Після проведених вимірювань ВП перераховувалась в л/100 км, що відповідає прийнятій в експлуатації АТ. Результати дослідження подано в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Вимірювання ВП АТЗ за допомогою ТАВ та об’ємним способом на маршруті руху

Номер заїзду	ВП, що визначалась		Відносна похибка, %
	об’ємним способом, л/100 км	за допомогою ТАВ, л/100 км	
в прямому напрямку руху			
1	6,12	6,363	3,84
2	6,111	6,37	4,07
3	6,123	6,343	3,47
4	6,142	6,331	2,99
5	6,117	6,354	3,73
6	6,129	6,355	3,56
7	6,151	6,274	1,96
8	6,139	6,367	3,58
9	6,121	6,372	3,94
10	6,145	6,376	3,62
Середнє значення	6,13	6,35	3,47
в зворотному напрямку			
1	6,11	6,22	1,7
2	6,05	6,2	2,42
3	6,11	6,25	2,24
4	6,12	6,28	2,55
5	6,0	6,15	2,44
6	6,02	6,21	2,9
7	6,05	6,15	1,63

Продовження табл. 4.5

8	6,04	6,22	2,89
9	6,08	6,15	1,14
10	6,12	6,19	1,31
Середнє значення			2,12
Похибка для всіх заїздів обох напрямків			2,8

В результаті досліджень роботи ТАВ на маршруті руху автомобіля встановлено, що:

- розроблений ТАВ здатний працювати в умовах руху автомобіля з необхідним рівнем надійності, використання його для транспортних ДВЗ є можливим і потребує додаткових досліджень робота ТАВ в широкому діапазоні дорожних і транспортних умов експлуатації транспортних засобів;
- відносна ПВВП на маршруті руху Citroen Berlingo з дизельним двигуном об’ємом 1,9 л, що визначена за допомогою ТАВ та об’ємним способом, на десяти заїздах в прямому та десяти заїздах в зворотному напрямках на маршруті протяжністю 1,2 км склала 2,8%.

Водночас важливо зазначити, що на етапі наведених експериментальних досліджень використано ТАВ найпростішої конструкції:

- без використання ТП, що розміщений з зовнішнього боку трубки для врахування температури НС з відповідною компенсацією похибок вимірювання;
- без регулювання температури на входах обох потоків палива, що обов’язково призводить до збільшення ПВВП;

- вимірювання виконано спрощеним шляхом без компенсації НП можливих випадкових та ДНП вимірювання (значення температурного поля перед НЕ та можливі випадкові похибки не контролювалися НП);

- дослідження проведено на стаціонарному швидкісному режимі руху автомобіля з використанням ДП. Потребує вивчення і перевірки питання роботи ТАВ у всьому діапазоні можливих витрат різних БП ДВЗ АТЗ;

- оскільки дослідження проведено на стаціонарному швидкісному режимі руху АТЗ, стає необхідною перевірка в експлуатації в усьому діапазоні можливих ВП підходу щодо обчислення логарифма виміряних значень температур блоком логарифмування ТАВ, що дозволить позбутися експоненційної залежності між температурою в заданій точці потоку та відстані до НЕ. Це зробить однаковою чутливість ТАВ у всьому діапазоні можливих ВП та зменшить ПВ, яка пов’язана зі зміною чутливості ТАВ за різних ВП;

- оскільки паливо, що не було споживано ДВЗ, поверталося в мірну ємність, деякі ПВВП не можуть бути компенсовані, наприклад, струмопідведення, температурна, сил тяжіння та в’язкого тертя тощо, що збільшило сумарну ПВВП.

Вище зазначалося, що за сучасними вимогами для проведення наукових досліджень ВП ДВЗ потрібно забезпечити ПВ не гірше 0,2–0,5%. А підвищення точності сучасних приладів ВП потребує як застосування нових методів та приладів, так і/або вдосконалення існуючиз класичних методів. Таким чином все вищезазначене потребує додаткових експериментальних досліджень в реальних умовах експлуатації автомобіля, особливо коли двигун працює на різних БП.

4.3.2 Дослідження впливу діаметра нагрівального елемента термоанемометричного витратоміра на похибку вимірювання витрати палива

Для перевірки впливу діаметра НЕ ТАВ на ПВВП було використано його макетний зразок (рис. 4.15).

Мета експериментальних досліджень – визначення похибок вимірювання ВП ТАВ безпосередньо в процесі руху ТЗ за використання НЕ різних діаметрів і розробити рекомендації щодо їх вибору.

В процесі дослідження в трубку ТАВ встановлювалися НЕ з ніхромового дроту загальною довжиною 38 мм з високим електричним опором (ніхром Х20Н80) двох видів: в першому НЕ розташовувався аксіально з трубкою витратоміра; в другому випадку – аксіально встановлена спіраль діаметром 10 мм (рис. 4.15).

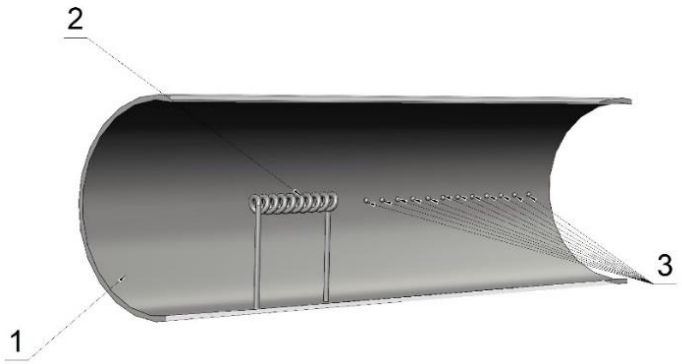


Рисунок 4.15 – ТАВ з аксіальним спіральним НЕ діаметром 10 мм:
1 – трубка; 2 – НЕ; 3 – ТП

Авторська розробка.

Вимірювання ВП проводилися на прямій горизонтальній ділянці дороги з асфальтним покриттям на швидкості руху автомобіля 50 км/год, відстань заїзду складала 1,2 км. ВП визначалася об’ємним способом та за допомогою ТАВ з різними встановленими НЕ (табл. 4.6).

Експериментальні дослідження показали, що зменшення діаметра НЕ від 10 мм до діаметра дроту дозволяє зменшити відносну ПВВП в 1,2 … 1,6 раза. Отже, діаметр НЕ, встановленого в трубці ТАВ, впливає на ПВВП і, щоб знизити вказану похибку, потрібно його зменшувати.

Таблиця 4.6 – Визначення ВП об'ємним способом та за допомогою ТАВ з НЕ різної форми

Номер заїзду	ВП, що визначалась, л/100 км			Відносна похибка між варіан-тами 1 та 2, %	Відносна похибка між варіан-тами 1 та 3, %
	об'ємним способом, л/100 км (варіант 1)	з НЕ, розташованим по осі трубки			
		витра-томіра, (варіант 2)	у вигляді спіралі, (варіант 3)		
1	6,12	6,363	6,531	3,84	6,29
2	6,111	6,37	6,512	4,07	6,16
3	6,123	6,343	6,466	3,47	5,3
4	6,142	6,331	6,467	2,99	5,03
5	6,117	6,354	6,468	3,73	5,43
6	6,129	6,355	6,477	3,56	5,37
7	6,151	6,274	6,499	1,96	5,35
8	6,139	6,367	6,486	3,58	5,35
9	6,121	6,372	6,469	3,94	5,38
10	6,145	6,376	6,564	3,62	6,38
Середнє значення	6,13	6,35	6,49	3,47	5,6

Потребує додаткового дослідження витратомір з НЕ плоскої спіральної форми (рис. 4.16).

Рисунок 4.16 – ТАВ з НЕ спіральної форми:
1 – трубка; 2 – НЕ; 3 – ТП;
Авторська розробка.

Імовірно запропонована форма НЕ зробить РТП більш рівномірним, що зменшить його вплив на ОТП і, відповідно, на ПВ витрат БП за допомогою ТАВ.

4.4 Можливі похибки та невизначеність вимірювань витрат біопалив термоанемометричним витратоміром

В науковій практиці вимірювань існують два підходи до їх оцінювання – концепція похибки і концепція невизначеності. В Україні оцінювання невизначеності під час калібрування та застосування приладів ВВ регламентує [173]. Цей документ окреслює сферу застосування, нормативні посилання, наводить терміни та означення, ознаки, містить загальні положення. В стандарті наведено випадкові невизначеності та межі систематичної похибки в разі

однократних вимірювань, лінійність калібрувальної характеристики, лінеаризацію даних, апроксимацію оптимальною прямою лінією, оптимальною зваженою лінією, обчислення невизначеності, процедуру оформлення результатів роботи. Описано невизначеність під час застосування калібрувальної характеристики для однократного ВВ. Також зазначено, що стандартні витратоміри підлягають калібруванню та повірці відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність».

ПВ поділяють за такими ознаками (рис 4.17):

- джерелом;
- закономірністю (характером) зміни;
- відображенням кількісних характеристик.

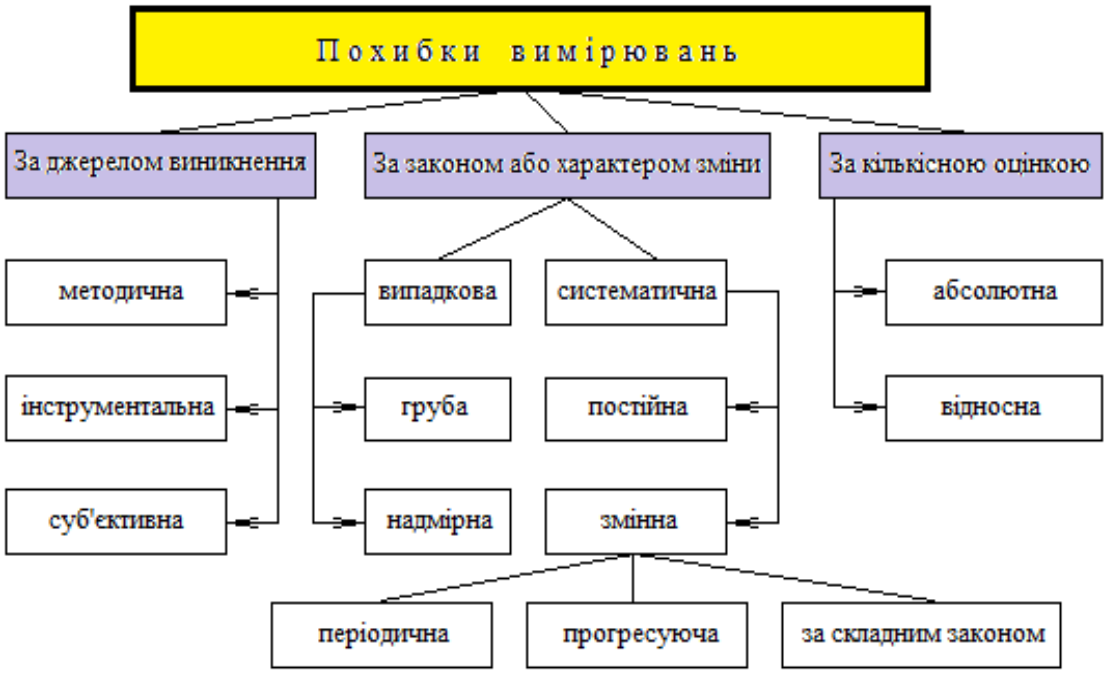


Рисунок 4.17 – Класифікація похибок вимірювань [173]

Практична користь вимірювання характеризується числовим значенням похибки, яка є кількісною характеристикою відхилення результату вимірювання від його істинного значення. ПВ виникають

внаслідок впливу різних факторів, що мають місце в процесі вимірювання.

Аналітичний підхід визначення похибок полягає в поділі їх на факторні складові, що дає можливість проаналізувати джерела виникнення, визначити їх властивості та вплив на отриманий результат вимірювання. Такий підхід дає можливість їх врахування у разі встановлення повної ПВ, коригування результату, проведення вимірювань так, щоб привести окремі складові, а в цілому всю похибку, до допустимого значення. Для кращої об’єктивності Щоб найоб’єктивніше оцінити похибки та намітити шляхи їх зменшення, з метою покращення якості вимірювання і достовірності їх результатів, потрібно знати причини виникнення складових повної похибки та закономірності їх прояву.

4.4.1 Похибки вимірювань за джерелом виникнення

Відповідно до основних структурних елементів процесу вимірювання виділяють складові похибки та їх джерела. Як джерела похибок вимірювань розглядають запропонований метод вимірювання, засіб вимірювальної техніки та суб’єкта (дослідника, оператора тощо). На основі такого підходу виділяють інструментальну, суб’єктивну та методичну складові загальної ПВ.

Методична складова похибки пов’язана з методом вимірювання і не залежить від властивостей засобів, що використовуються для вимірювань. Джерела методичних похибок відрізняються для опосередкованих (непрямих) і прямих (безпосередніх) вимірювань.

До поширених методичних похибок прямих вимірювань відносять похибки:

- що зумовлені невідповідністю фізичної моделі об’єкта вимірювання реальному об’єкту. Фактично вимірювана величина за фізичною моделлю об’єкта вимірювань та фізична величина, яка реально

відтворює властивість об’єкта вимірювання, відрізняються. Невідповідність прийнятої фізичної моделі об’єкта вимірювань називають граничною невідповідністю. Вона викликає принципово неусувну складову методичної похибки;

- що зумовлена зміною залежності між вимірюваною і проміжною величинами у випадках, коли в процесі вимірювання використовують проміжне перетворення засобами вимірювальної техніки;

- похибка передавання вимірюваної величини від об’єкта вимірювання до засобів вимірювальної техніки, тобто фізичне з’єднання засобу вимірювальної техніки з об’єктом вимірювань не завжди здійснюється так, щоб розмір вимірюваної величини був однаковий на виході об’єкта вимірювань і на вході засобу вимірювальної техніки. Наприклад, таку похибку можуть вносити з’єднювальні дроти між об’єктом вимірювань та засобом вимірювальної техніки.

До характерних методичних похибок, які є специфічними для непрямих вимірів, належать похибки:

- обчислень, зокрема похибка алгоритму або програмна похибка обчислень;

- зумовлені тим, що функції обчислюються як неперервні, а реально вони є дискретними.

Особливістю методичних похибок вимірювань є їх неконкретність, саме тому вони не піддаються кількісному оцінюванню. Враховуючи це, методичні похибки зазвичай не нормуються і не вказуються в технічній документації, а мають оцінюватися дослідником у процесі реалізації вибраного методу вимірювання з урахуванням умов експлуатації засобів вимірювання. Але, якщо метод використовується тривало, його похибки можуть бути встановлені.

Методичну похибку у процесі вдосконалення термоанемометричного методу ВВ БП потрібно зменшувати

використанням відповідних МП засобів з використанням сучасних НП, алгоритмів отримання та обробки інформації тощо.

Інструментальна складова загальної ПВ зумовлена властивостями використовуваних засобів вимірювання.

Інструментальна похибка в процесі ВВ БП може бути зменшена вдосконаленням конструкції ТАВ, пристосуванням його до умов роботи АТЗ, підвищенням швидкодії, точності вимірювання, чутливості ТАВ в усьому діапазоні можливих витрат різних БП з різними ОК різних біологічних домішок.

Суб'єктивна складова похибки залежить не тільки від кваліфікації дослідника, але і від його індивідуальних психофізіологічних властивостей, що визначають результат вимірювання (слух, зір, реакції тощо), концентрація уваги, ступеня втомленості тощо. Така похибка частіше характеризується похибкою відліку, яка зумовлена діями дослідника (оператора). Вона проявляється в тому, що однаковий показ приладу, різні оператори зчитують по-різному.

Ще одним різновидом суб'єктивної ПВ є похибка паралакса, зумовлена взаємним розташуванням ока експериментатора, стрілки і шкали вимірювального приладу. В цифрових вимірювальних приладах, яким є розроблений ТАВ, округлення виконується автоматично, а похибка округлення, що виникає при цьому (похибка квантування), нормується.

Отже, суб'єктивні похибки не мають кількісної оцінки і не входять в математичний опис повної ПВ. Але, таки похибки усуваються за рахунок автоматизації процесу ВВ БП, наприклад, використанням сучасної МП техніки, тобто повним усуненням суб'єкта з цього процесу.

4.4.2 Похибки вимірювань витрат біопалив за закономірністю їх змінювання

ПВ відрізняються характером змінювання при повторних вимірюваннях і за цією ознакою їх поділяють на систематичні та випадкові. Така ознака поділу похибок має дві мети.

Перша мета – це придатність різних математичних методів об’єднання складових ПВ для розрахунку повної похибки. Якщо складові ПВ постійні (або змінюються за певним законом), для їх визначення придатні методи функціонального аналізу. Якщо складові ПВ випадкові, для її розрахунку придатні методи математичної статистики.

За досягнення першої мети можна забезпечити і другу – поділ ПВ на випадкову або систематичну, для подальшого визначення раціональних методів їх зниження.

Випадкова похибка – це частина загальної похибки, яка проявляється непередбачувано у разі повторних вимірювань фізичної величини. Причини появи таких похибок: випадкова дія різних факторів на метрологічні характеристики засобів вимірювання. Випадкові похибки, як правило, є інструментальними.

Внаслідок непередбачуваності випадкова похибка може бути усунена за допомогою постійного спостереження за процесом вимірювання та постійним аналізу в процесі статистичної обробки багаторазових результатів вимірювань, що досягається використанням сучасних МП систем з НП.

Окремим видом випадкових похибок є *грубі похибки*. До них відносять такі, що істотно відрізняються від очікуваних. Надмірними називають великі за значенням грубі похибки, які виявляють і усувають з аналізу на етапі отримання або використанням статистичних методів. Результат вимірювання з надмірними

похибками називають промахом, який є очевидним і має усуватися вже на етапі попереднього розгляду результатів вимірювання.

Систематичною називають похибку, яка і за повторних вимірювань залишається постійною або змінюється за певним законом. За причинами виникнення їх поділяють на: методичні, інструментальні та суб'єктивні. Окремі інструментальні похибки засобів вимірювання, бувши систематичними, можуть також вважатись випадковими для групи однакових засобів вимірювальної техніки.

За характером зміни від одного вимірювання до іншого виділяють змінні, постійні і систематичні похибки. Постійні систематичні похибки є незмінними в часі. До них належать методичні, інструментальні та суб'єктивні похибки. Такі в результатах вимірювань важко виявити, оскільки вони, на відміну від випадкових та інших систематичних похибок, ніяким чином себе не проявляють себе в процесі повторного вимірювання. Для їх визначення і аналізу потрібно проводити окремі метрологічні дослідження (перевірку), що пов'язані з порівнянням їх показів з показами зразкового засобу вимірювальної техніки.

Важливою особливістю постійної систематичної похибки є її передбачуваність і завдяки цьому можливість усунення (врахування).

Змінні систематичні похибки не є постійними в процесі вимірювання і за характером їх зміни поділяються на прогресуючі (дрейфові), періодичні та змінювані за певним законом.

До прогресуючих відносять систематичні похибки, що змінюються в часі монотонно. В більшості випадків вони пов'язані з процесами старіння засобів вимірювання, їх електронних елементів, розряджанням ДЖ, механічною деформацією тощо.

Прогресуючі похибки можуть бути скориговані за допомогою поправок, але тільки в заданий момент часу, тобто, вони потребують

постійної корекції, яку треба проводити частіше, чим меншим очікується їх залишкове значення. Ще одна особливість похибок прогресуючих – їх зміна в часі, як правило, нестаціонарна і частіше описується випадковими функціями. Тому такі похибки віднести до систематичних можна лише умовно.

Важливо розуміти, що систематична похибка може бути викликана декількома факторами, тому її зміна може відбуватись за складним законом. Ознакою похибок систематичних є можливість їх передбачення, зменшення або вилучення з результатів вимірювань.

Іноді до систематичних відносять лише постійні похибки, використовучи корекцію кожного результату вимірювання, але найбільш коректним є підхід врахування систематичних похибок незалежно від характеру їх зміни, що не завжди можливо. Якщо систематичні похибки не можуть бути враховані, їх відносять до випадкових та називають невилученими систематичними похибками.

В загальному вигляді повна ПВ складається з систематичної та випадкової, тому її слід розглядати в цілому як випадкову величину. Математичне сподівання повної похибки являє собою її абсолютну систематичну складову Δ_c, центрована складова повної ПВ – її абсолютну випадкову складову $\mathring{\Delta}$. За будь-яким законом розподілу абсолютну повну ПВ визначають:

$$\Delta = \Delta_C + \dot{\Delta}, \tag{4.8}$$

де $\Delta_C = M[\Delta]$;

$\dot{\Delta} = \Delta_C - M[\Delta] = \Delta - \Delta_C$;

M – знак математичного сподівання.

Якщо систематична складова ПВ Δ_c відома, її вилучають з результату вимірювання X (або вводять поправку). Виправлений (скоригований) результат вимірювання:

$$\tilde{\tilde{X}} = X - \Delta C \tag{4.9}$$

За результат вимірювання приймають такий $\tilde{\tilde{X}}$, з якого поправкою вилучена систематична складова ПВ.

4.4.3 Відображення кількісних характеристик похибок вимірювань

Кількісні значення похибок вимірювань прийнято подавати в абсолютній та/або відносній формах.

Абсолютна ПВ – це різниця між результатом вимірювання X та істинним значенням вимірюваної величини X_i. Якщо істинне значення вимірюваної величини невідомо, то використовують умовно істинне значення X_y:

$$\Delta X = X - X_i = X - X_y. \tag{4.10}$$

З абсолютною похибкою пов’язане таке поняття, як поправка, – значення величини, однорідною з вимірюваною, що додається до результату вимірювання з метою вилучення систематичної ПВ:

$$\Delta C = \Delta X \tag{4.11}$$

Як підсумок можна записати:

$$X_y = X + (-X) = X + \Pi \qquad (4.12)$$

З (4.12) можна зробити висновок: якщо до результату вимірювання X додати абсолютну похибку с протилежним знаком -ΔX, то отримаємо більш точне, умовно істинне значення величини, що вимірюється, X_y або виправлений результат $\tilde{\tilde{X}} = X$. Отже, величина (-ΔX) є поправкою $П$ до результату вимірювання X:

$$\Pi = -\Delta X \qquad (4.13)$$

Поправка і абсолютна ПВ наводяться в одиницях вимірюваної величини. Водночас, постійна систематична похибка коригує результати вимірювання на однакову величину, що призводить до труднощів її виявлення і введення відповідної поправки.

Крім поправки використовують коригувальний коефіцієнт – це число, добуток якого з невиправленим результатом вимірювання X дає вилучення систематичної похибки, і кінцевий результат вимірювання визначають за формулою:

$$\tilde{\tilde{X}} = k_K X, \qquad (4.14)$$

де k_K – коригувальний коефіцієнт.

Абсолютна похибка ΔX характеризує якість отриманого результату. Важливо, що точність вимірювання (якість) не можна оцінювати порівнянням абсолютних похибок результатів вимірювань. Краще уявлення про якість вимірювань дає відносна ПВ, яка за своєю логікою поєднює результат вимірювання і абсолютну похибку.

Відносна похибка визначається відношенням абсолютної похибки ΔX вимірювання до істинного чи умовно істинного значення вимірюваної величини або до результату вимірювання X.

Відносна ПВ у відносних одиницях визначається:

$$\delta X = \frac{\Delta X}{X_i} = \frac{\Delta X}{X_y} = \frac{\Delta X}{X}, \tag{4.15}$$

або у відсотках, %

$$\delta X = \frac{\Delta X}{X_i} 100 = \frac{\Delta X}{X_y} 100 = \frac{\Delta X}{X} 100. \tag{4.16}$$

Через відносну ПВ визначають точність вимірювання, яку оцінюють величиною, оберненою модулю відносної похибки до відносної похибки за модулем.Отже, точність тим вища, чим менша відносна похибка. В процесі вимірювання потрібно визначати абсолютну похибку, що досягається автоматизацією процесу ВВ БП використанням МП систем.

4.4.4 Якість і невизначеність вимірювань витрат палив термоанемометричним витратоміром

Для кількісного оцінювання впливу похибки та її складових на результат вимірювання використовують показники: точність, збіжність, відтворюваність, правильність.

Точність вимірювань визначають через відносну ПВ, з визначення та змісту яких витікає висновок: чим менша відносна похибка, тим вища точність вимірювання.

Збіжністю вимірювань називають показник якості, що показує близькість результатів вимірювань до розміру фізичної величини.

Отже, збіг результатів вимірювань відображає близькість випадкової похибки до нуля.

Відтворюваність (повторюваність) вимірювань визначається близькістю результатів вимірювань до розміру фізичної величини, що їх отримують у різних місцях і в різний час вимірювань різними методами та засобами, тобто характеризує стабільність параметра, що вимірюється різними методами, засобами, в різний час.

Збіжність, відтворюваність, стабільність вимірювань можуть бути оцінені кількісно, наприклад, дисперсією їх результатів.

Стабільність вимірювань визначається варіацією значень вимірюваної величини за багаторазових вимірювань. Її також оцінюють за допомогою середньоквадратичного відхиленням за декілька вимірювань:

$$\sigma = \sqrt{\sum_1^n \frac{(\bar{X}-X)^2}{n-1}}, \qquad (4.17)$$

де $\bar{X}$ – середнє значення результату попередніх вимірювань;

n – кількість вимірювань.

Неважко встановити, що чим більше значення має σ, тим гірша відтворюваність (повторюваність) вимірювань. І якщо $\sigma \to 0$, то таке вимірювання збігається з середнім значенням попередніх вимірювань, і подальші вимірювання цієї фізичної величини не мають сенсу, тобто приводять до відомого результату. Внаслідок дії похибок різної природи і характеру на практиці виконання вказаної умови практично неможливе, і в цьому випадку приймають завідомо задовільне значення середньоквадратичного відхилення, наприклад, σ=0,05. Зміст такого значення середньоквадратичного відхилення в тому, що

тільки 5% вимірювань цієї фізичної величини не збігаються з середнім її значенням за n вимірювань.

За поточним значенням σ можна також встановити потрібну загальну кількість вимірювань для таких конкретних експериментальних досліджень. У разі досягнення для цього дослідження заздалегідь прийнятого значення середньоквадратичного відхилення подальші вимірювання цієї фізичної величини не мають сенсу, оскільки не несуть додаткової корисної інформації.

Правильність вимірювання – показник якості, що відображає близькість до нуля систематичних похибок, тобто вона відображає вплив систематичної похибки на результат вимірювання.

У вітчизняних нормативних документах оцінювання точності вимірювань ґрунтується на понятті ПВ, а інший підхід, що рекомендується Міжнародною електротехнічною комісією та багатьма міжнародними організаціями, пропонує до використання поняття «невизначеність».

Але, сьогодні немає обґрунтувань відмови від терміна «похибка» і заміни його терміном «невизначеність». Також зрозуміло, що рекомендовані кількісні характеристики невизначеності мають практично однаковий або дещо модифікований вигляд і однаковий фізичний зміст, як для похибок. Тому заміну цих термінів треба сприймати асоціацією їх розуміння. Термін «похибка» асоціюється з визначеною величиною, а «невизначеність» – з сумнівом, що точніше відображає зміст результату вимірювання.

Невизначеність вимірювань – це параметр, що характеризує розсіяння виміряних значень фізичної величини і означає сумнів відносно вірогідності отриманих результатів вимірювань.

Для кількісного подання пропонуються три види невизначеності: стандартна (типу *A* і *B*); сумарна стандартна; розширена.

Стандартна – це невизначеність результату прямих вимірювань, яка визначається середньоквадратичним відхиленням (4.17).

Стандартна типу *A* – це невизначеність, що обчислюється статистичними методами обробки результатів багаторазових вимірювань. Стандартна невизначеність типу *B* обчислюється за деякою апріорною інформацією: даними попередніх вимірювань; даними вимірювань, що ґрунтуються на досвіді дослідника або знаннях про поведінку об’єктів і засобів вимірювання, даними їх перевірки, калібрування тощо; невизначеності констант та довідкових даних.

Невизначеність усіх даних відображають прийнятими межами відхилення результату вимірювання від оцінки істинного значення вимірюваної величини. Отже, невизначеність типу *B* залежить від закону розподілу можливих значень цієї величини.

Сумарна стандартна невизначеність має фізичний зміст дисперсії результату непрямих вимірювань і обчислюється через дисперсії (квадрати стандартних невизначеностей) інших фізичних величин (аргументів), через які визначається шукана фізична величина.

Розширена невизначеність – це величина інтервалу, в межах якого знаходиться більша частина результатів непрямих вимірювань, вона обчислюється через сумарну стандартну невизначеність.

Висновки до розділу 4

1. Доведено, що для зменшення ПВВП АТЗ необхідно зменшувати вплив РТП ТАВ на ОТП, а також зменшувати діаметр НЕ та збільшувати діаметр трубки ТАВ.

2. Отримано залежності відношення діаметра трубки до діаметра НЕ ТАВ для матеріалів трубки різної теплопровідності, що дозволяє зменшити вплив РТП на осьовий і зменшити ПВВП.

3. Експериментальним вимірюванням ВП на маршруті руху АТЗ встановлено, що:

- розроблений ТАВ здатний працювати в умовах руху АТЗ з необхідним рівнем надійності, потребує додаткових досліджень робота ТАВ в більш широкому діапазоні дорожніх і транспортних умов експлуатації АТЗ;
- відносна ПВВП на маршруті руху автомобіля Citroen Berlingo з дизельним двигуном об’ємом 1,9 л, що визначено за допомогою ТАВ та об’ємним способом, на маршруті протяжністю 1,2 км склала 2,8 %.
- діаметр НЕ в трубці ТАВ впливає на ПВВП та його зменшення дозволяє знизити цю похибку в 1,2-1,6 рази.

4. Необхідне проведення дослідження роботи ТАВ з НЕ плоскої спіральної форми, оскільки імовірно запропонована форма НЕ зробить РТП більш рівномірним, що зменшить його вплив на ОТП і, відповідно, на ПВ витрат БП.

5. Проведено оцінку якості, можливих похибок та невизначеності ВВ БП ТАВ. Зазначено, що розбіжність результатів отриманих експериментально і комп'ютерним моделюванням можлива внаслідок різних фізико-хімічних властивостей (теплопровідність, в’язкість, густина тощо) палива і його властивостей, що задаються в комп'ютерній моделі.

РОЗДІЛ 5
ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНІ ВИТРАТОМІРИ БІОПАЛИВ ПІДВИЩЕНОЇ ТОЧНОСТІ ТА З РОЗШИРЕНИМ ФУНКЦІОНАЛОМ

Нові можливості теплових методів вимірювання ВП виявляються в процесі функціонування термочутливих елементів в нестаціонарному режимі підведення тепла, з подальшою реєстрацією характеристик температурного обміну, які відображають умови теплообміну, а отже, – ВП. Всі теплові методи вимірювання та контролю ВП одночасно з забезпеченням метрологічних характеристик використовують вихідний сигнал у формі «частота-година», що дає можливість обробляти інформацію за допомогою сучасної МП техніки.

До переваг термоанемометричного методу вимірювання ВП відносять:

- досить високі динамічні характеристики, що не пов’язані з об’єктом контролю;
- широкий діапазон змін контрольованих витрат;
- використання частотного вихідного сигналу;
- компенсація температурних похибок шляхом комплексної обробки вихідного сигналу;
- відсутність рухомих частин, що дає потенційно високу надійність в умовах роботи АТЗ.

Вимірювання і контроль ВП є складовою сучасних технологій енергозбереження. Вони потрібні практично протягом всього життєвого циклу АТЗ, а використання БП, що мають інші ФХВ, порівняно з властивостями нафтових палив, висуває специфічні вимоги до засобів вимірювання та вимагає їх удосконалення. Це пов’язано з відмінностями у фізичних властивостях складових БП.

Зазначені недоліки дозволяють усунути ТАВ, що розроблено і пропонується до використання на АТ.

5.1 Високоточний витратомір біопалив з цифровою обробкою вимірювальної інформації

Вимірювання і контроль ВП є складовою частиною сучасних енергозберігаючих технологій. Їх застосовують в процесах випробування, ремонту та штатної експлуатації АТЗ з ДВЗ. Впровадження нових видів БП, у яких ФХВ, відмінні від звичайних нафтових палив, висуває низку специфічних вимог до витратомірів і вимагає їх удосконалення. Насамперед це пов’язано з підвищеною густиною та в’язкістю БП, що призводить до суттєвого збільшення похибок вимірювань відомими засобами.

За пропонований прототип ТАВ прийнятий відомий прилад [97]. Як і запропонований, ТАВ-прототип містить НЕ, розташований у потоці палива, ДЕ, вихід якого під’єднаний до входу НЕ, та два ТП.

На відміну від запропонованого ТАВ, прототип містить тільки два ТП, які розміщені по різні боки від НЕ на деякій відстані. Таке розташування приводить до того, що при зміні ВП зміни температурного поля біля цих ТП відбуваються з затримкою в часі. Особливо значною ця затримка проявляється для палив з підвищеною густиною, в’язкістю, низькою теплопровідністю. Самі ТП також вносять затримку в часі в зміну сигналу вимірювання при зміні ВП, що пояснюється їх інерційними властивостями.

Згідно з наведеними міркуваннями, у разі змін величин витрат виникають значні ДНП вимірювання ВП. Оскільки в прототипі відсутня корекція вказаних похибок, він має відносно низьку точність ВП.

БП має ФХВ, що відрізняються від властивостей нафтового рідкого палива. Крім того, вони можуть відрізнятись в біопаливах різних виробників, отриманиз за різних технологій та сировини. Водночас змінюється температурне поле за однакових ВП.

Оскільки ТАВ-прототип не має засобів компенсації відмінностей температурного поля різних біопалив, має місце додаткова ПВ у разі його зміни під час експлуатації ТАВ.

На показники температурного поля в паливі впливає температура НС. Оскільки в складі ТАВ-прототипу відсутні засоби вимірювання температури НС, то виникає додаткова ПВВП, зумовлена змінами температури НС в процесі експлуатації ТАВ-прототипу. Значною вказана похибка може бути за вимірюваннь ВП ДВЗ в змінних умовах клімату.

В такому прототипі відсутні можливості та засоби для накопичення, аналізу та зберігання отриманої інформації щодо ВП, що обмежує його функціональні можливості в експлуатації.

Отже, існуючий ТАВ має низьку точність вимірювання ВП, обмежені функції вимірювання, що особливо необхідні для ВВ БП.

Для покращення властивостей ТАВ потрібно провести його вдосконалення з погляду підвищення точності вимірювання і розширення його функціональних можливостей щодо ВВ БП.

Поставлена задача вирішується, так: в схему ТАВ-прототипу введені ТП, один з яких розміщений на НЕ, а інший знаходиться ззовні трубки ТАВ, ТП встановлено в потоці БП послідовно на відстанях l_1 і l_2 від третього ТП. Також передбачено НП, БПМ та ЕОМ. Важливо, що виходи перших чотирьох ТП під’єднано до відповідних входів НП, вхід номер п’ять якого приєднаний до виходу БПМ, а вихід НП – на вхід ЕОМ, вихід перший ЕОМ під’єднано до входу БПМ, а другий є виходом розробленого ТАВ.

В запропонованому ТАВ використано НП з виконанням корекції ДНП. Він програмно реалізує відновлювальний фільтр вимірюваної інформації (ВІ) за допомогою штучної НМ з адаптивними лінійними нейронами [98, 99]. Результатом вказаної фільтрації є корекція ДНП вимірювань.

В новому ТАВ передбачено ЕОМ та БПМ. У разі зміни біопалива вказані блоки разом з НП забезпечують адаптацію ТАВ до ФХВ нового палива, яка здійснюється оператором через введення в ЕОМ показників властивості нового БП та навчання штучної НМ в НП. В цьому процесі використовуються тестові сигнали, що надходять в НП з БПМ під управлінням ЕОМ. Отже, врахуванням відмінностей ФХВ різних БП підвищується точність вимірювання їх витрат.

В запропонованому ТАВ використано чотири ТП. Перший та другий ТП розміщено у потоці БП на відстанях l_1 і l_2 від третього ТП, який розміщено на НЕ. Таке рішення дозволяє отримати більш точний та повний розподіл температур у потоці, особливо для БП, що має підвищені в’язкість та густину, внаслідок чого характеризується нерівномірним протіканням повз ТП ТАВ. Четвертий ТП розміщено ззовні трубки. Цей ТП дозволяє отримати зміни температур НС та врахувати їх в процесі ВВ, що важливо в процесах вимірювання ВП ДВЗ в змінних умовах клімату. В результаті підвищується точність ВВ вказаних палив.

Розширення функціональних можливостей розробленого ТАВ досягається використанням ЕОМ для аналізу і зберігання інформації про поточні та сумарні ВП, завдяки чому запропонований ТАВ має підвищену точність та розширені функціональні можливості ВВ нафтових палив та БП.

На рис. 5.1 зображено структурну схему пропонованого ТАВ. ТАВ з цифровою обробкою ВІ має в своєму складі трубку 1 з потоком

2 палива, НЕ 3, ДЕ 4, перший 6, другий 7, третій 5 та четвертий 11 ТП, НП 8, БПМ 9 та ЕОМ 10.

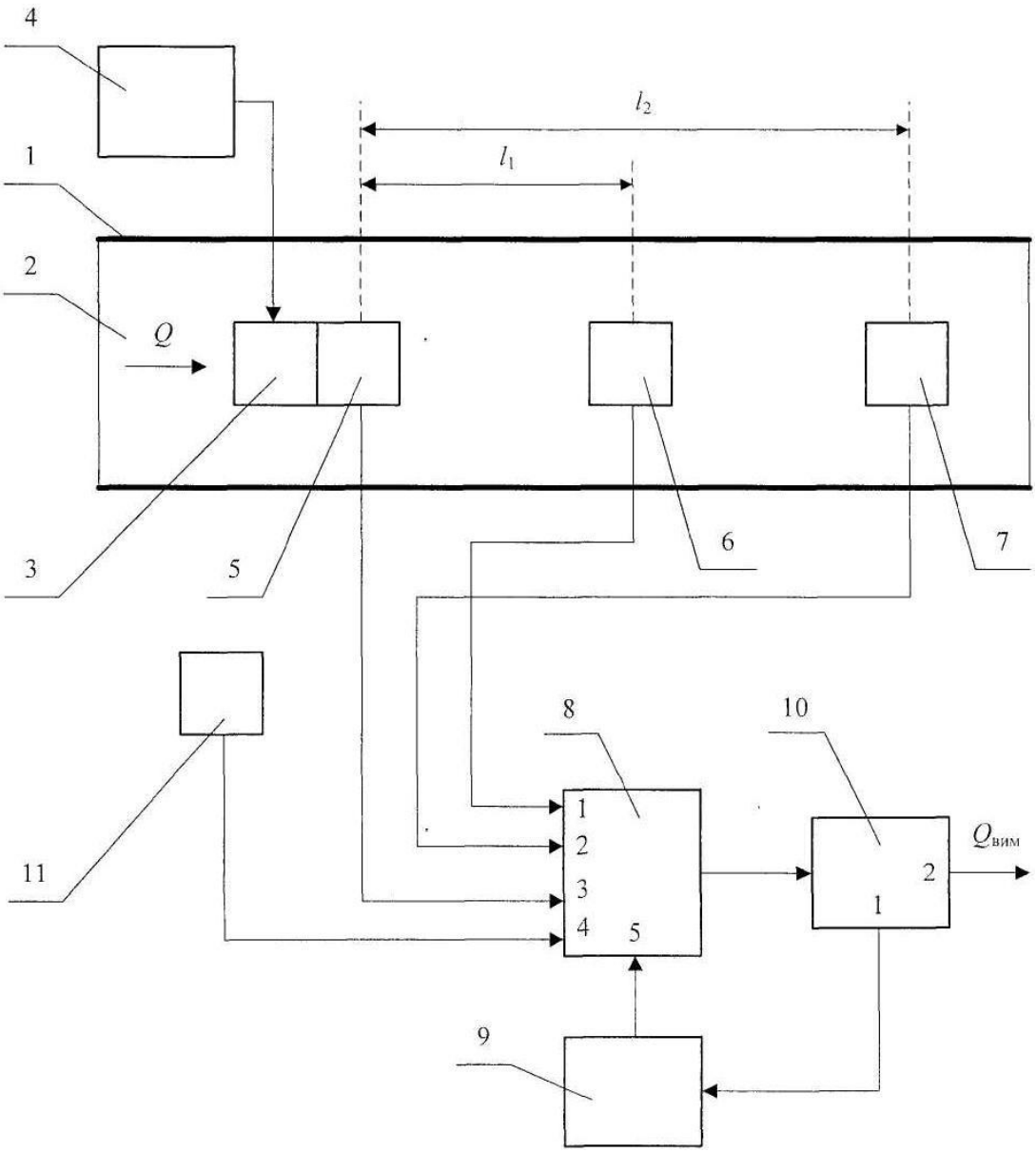


Рисунок 5.1 – Схема високоточного ТАВ з цифровою обробкою ВІ: 1 – трубка; 2 – потік палива; 3 – НЕ; 4 – ДЕ; 5, 6, 7, 11 – третій, перший, другий, четвертий ТП; 8 – НП; 9 – БПМ; 10 – ЕОМ

Авторська розробка.

До входу НЕ 3 під’єднано вихід ДЕ 4. Четвертий ТП 11 розміщено ззовні трубки 1. Третій ТП 5 розміщено на НЕ 3, а перший

6 і другий 7 ТП – у потоці 2 палива один за одним на відстанях l_1 і l_2 від третього ТП 5.

Виходи ТП 5–7 та 11 під'єднано до першого, другого, третього та четвертого входів НП 8, п'ятий вхід якого – з виходом БПМ 9. Вихід НП 8 з'єднано з входом ЕОМ 10, а перший вихід ЕОМ під'єднано до входу БПМ 9, другий вихід ЕОМ є виходом ТАВ. Витратомір працює так.

Потік палива 2, витрати Q якого потрібно виміряти, протікає повз НЕ 3 та ТП 5–11. До НЕ 3 від джерела електричної енергії 4 створює в потоці БП 2 температурне поле.

Температура БП зі збільшенням відстані від НЕ 3 зменшується, що реєструється ТП 5, вона є обернено пропорційною ВП. Зменшення температури фіксуються ТП 6 та 7, що обернено пропорційно значенню ВП. Значення температур залежать від ФХВ палива [98].

Результати реєстрації надходять в НП 8, який обробляє годинні послідовності значень для компенсації ДНП. Вказані похибки виникають внаслідок інерційності ТП 5–7 у разі зміни поточних значень ВП. Значення температури НС від НЕ 11 також надходять до НП 8.

Параметри алгоритмів для обробки отриманих значень температур, що реалізовано в НП 8, коригуються залежно від ФХВ палива, що виконують введенням в ЕОМ даних про ці властивості виду БП з навчанням штучної НМ (на рис. 5.1 не показана) в НП 8. Навчання проводять з використанням тестових сигналів ВІ, які подають на п'ятий вхід НП 8 з БПМ 9 за допомогою ЕОМ 10. Корекція даних параметрів забезпечує врахування ФХВ наявного БП і, за допомою цього, точну корекцію ДНП ВВ.

Значення температур НС та потоку 2 палива, з урахуванням ДНП, надходять з виходу НП 8 до ЕОМ 10, яка за залежностями [98] перераховує їх значення в величину ВП та видає результат $Q_{вим}$ на

вихід 2 ТАВ. В ЕОМ 10 можна додатково вводити інформація про вид БП (склад і/або ФХВ), а вона коригує параметри алгоритмів перерахунку значень температури у значення ВП. Отже, забезпечується більш точний перерахунок, що підвищує точність ВВ БП. Зберігання та аналіз інформації також виконує ЕОМ.

Для перевірки працездатності запропонованого ТАВ було створено його діючий макет. Трубку 1 вибрано металеву, діаметром 20 мм, довжиною 300 мм. Як ДЕ 4 використано блок живлення постійного струму напругою 12 В. НЕ 5 виконано у вигляді циліндричної котушки, з ніхромового дроту марки Х20Н80, для ТП вибрано транзистори КТ342, в яких величина струму колектора змінюється залежно від температури потоку палива.

За ТП 11 використано промисловий датчик температури, що має цифровий вихід та узгодження зі стандартними вхідними інтерфейсами ЕОМ.

Для вимірювання витрат використовувався БД, отриманий з РО, основні ФХВ якого: густина (при t = 20 °С) – 877 кг/м^3; кінематична в’язкість (при t = 20 °С) – 8,0 мм^2/с; вміст: сірки – не більше 0,02%; води – 0,05%; гліцерину – 0,3%.

В дослідженні використано цифрову ЕОМ Pentium 4 – 1,7 ГГц, НП 8 та БПМ 9 моделювалися програмним способом.

Характеристики високоточного ТАВ палива з цифровою обробкою ВІ досліджувалися на діючому макеті в нестаціонарних умовах експлуатації, відповідно до ВП ДВЗ. Точність ВВ БП з використанням корекції ДНП та врахуванням його ФХВ підвищилася в 1,5 ... 1,8 раза.

Отже, запропонований ТАВ забезпечує підвищення точності та має розширені функціональні можливості ВВ БП.

5.2 Витратомір біопалив з цифровою обробкою вимірювальної інформації

ТАВ з обробкою ВІ пропонується для вимірювання та контролю ВП [32].

Прототипом розробленого ТАВ є витратомір [31]. Як і ТАВ, що пропонується, прототип складається з трубки з потоком палива, з розміщеними в ній НЕ та ще по одному ТП з різних боків від нього.

Розроблений ТАВ, на відміну від ТАВ-прототипу, містить два ТП, розташованих на однакових відстанях по різні боки від НЕ. ТАВ-прототип призначений для вимірювань досить великих значень ВП [38], що не завжди відповідає реальним ВП в ДВЗ АТЗ.

Розподіл температури палива вздовж осі трубки перед та після НЕ описується експонентою, аргументом якої є відстань до НЕ [31]. Параметри цієї залежності пропорційні швидкості потоку та, відповідно, ВП. Тому залежність між температурою, що вимірюється ТП та ВП, має нелінійну форму.

В результаті у разі зміни ВП в широкому діапазоні має місце зміна чутливості ТАВ. Отже, за таких змін виникає додаткова ПВ. Засоби корекції вказаної похибки в цьому ТАВ відсутні, тому він має незадовільну точність.

Якщо вказати на наявність нерівновимірного розподілу течії палива, що змінює характеристики температурного поля, що притаманно паливам з підвищеною густиною та в’язкістю, можна дійти висновку про наявність появи додаткових похибок ВВ. В електричних колах ТП практично постійно наявні випадкові завади та шуми. Всі ці фактори призводять до появи випадкових похибок вимірювання ВП. Оскільки прототип має тільки два ТП та в ньому відсутні засоби компенсації вказаних похибок, його точність може бути незадовільною за використаня на АТЗ.

В процесі розробки нового ТАВ поставлено задачу вдосконалення ТАВ шляхом додаткового введення БЛ, ЛА, обчислення ВП, ТП, розміщеного в паливі поза зоною дії НЕ, двох груп ТП, розміщених по боках від НЕ, водночас ТП в групах встановлено послідовно на певних відстанях від НЕ, виходи груп ТП та ТП під'єднано на вхід БЛ, вихід якого з'єднаний з входом блока ЛА, вихід якого – до входу блока обчислення ВП, вихід якого є виходом ТАВ.

В розробленому ТАВ використано дві групи ТП, які реєструють температури БП вздовж осі витратоміра, до та після НЕ. Отримані температури надходять до БЛ, далі – до блока ЛА. БО ВП визначає витрати за результатами ЛА та залежності між логарифмом температури точки потоку палива та її відстані до НЕ.

Обчислення логарифма виміряних температур у БЛ дозволяє позбутися нелінійної експоненційної залежності між значеннями температур в точках потоку БП та її відстані до НЕ. Завдяки цьому чутливість запропонованого ТАВ стає однаковою в усьому діапазоні ВП. Це дозволяє усунути додаткову ПВ, що пов'язана з можливими змінами чутливості витратоміра для різних значень діапазону вимірюваня ВП.

У розробленому витратомірі за наявності груп ТП та властивостей процедури ЛА результатів забезпечується зменшення впливу випадкових похибок вимірювання температур на результат вимірювання ВП.

Отже, за наявності груп ТП, БЛ, блоків ЛА та БО ВП забезпечується підвищення точності вимірювання ВП.

Запропонований витратомір палива з цифровою обробкою ВІ (рис. 5.2) містить трубку 1 з потоком 2 палива, в якому розташовано НЕ 3 та групи ТП 4, 5. Розроблений ТАВ також має ТП 6 у потоці 2 БП поза зоною дії НЕ 3, БЛ 7, блок 8 ЛА та БО 9 ВП.

Групи ТП 4, 5 розташовано по боках НЕ 3, ТП в групах розміщено на фіксованих відстанях x_t від НЕ 3, i = 1...(N_1+N_2), де N_1 і N_2 – кількість ТП в групах.

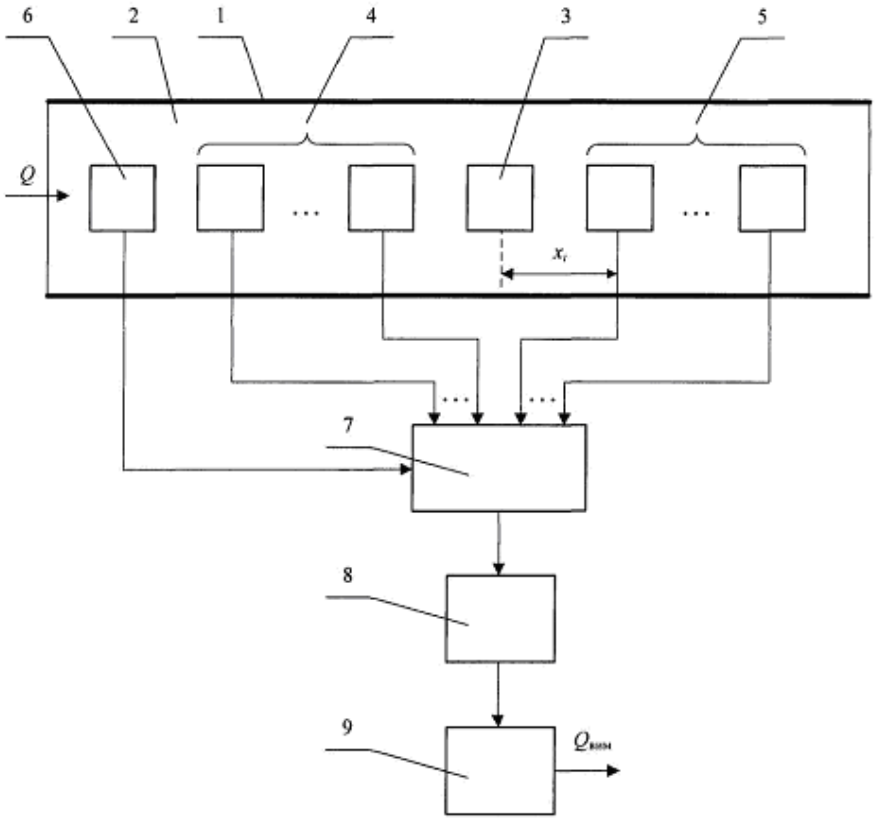


Рисунок 5.2 – ТАВ палива з цифровою обробкою ВІ: 1 – трубка; 2 – потік палива; 3, – НЕ; 4, 5 – групи ТП; 6 – ТП; 7 – БЛ; 8 – блок ЛА; 9 –БО ВП

Авторська розробка.

Виходи груп 4, 5 ТП та ТП 6 під’єднано на вхід БЛ 7, вихід якого – на вхід блока 8 ЛА, вихід якого – до входу БО 9 ВП, вихід якого є виходом ТАВ.

ТАВ працює так. Потік палива 2, витрати *Q* якого вимірюються, протікає в трубці 1 повз ТП 6, НЕ 3 та групи 4, 5 ТП. НЕ 3 підігріває потік 2 палива (електрична енергія підводиться від ДЖ (на схемі не показаний)) та утворює в потоці температурне поле. Значення

температур потоку залежать від ВП, відстані від НЕ до ТП у групах 4, 5 та ТП 6 збільшуються/зменшується (перед НЕ/після НЕ) експоненційно. За виміреною температурою палива, що утворюється НЕ 3 та реєструється групами ТП 4, 5, визначається ВП [34]. Результати вимірювання температур палива надходять у БЛ 7.

Графічну залежність між температурою *T(x)* в заданих точках потоку палива та відстанню *x* до НЕ наведено в [34], її можна апроксимувати:

$$T(x) = b_1 e^{-a_1 x} b_2 e^{-a_2 x} + T_0, \tag{5.1}$$

де b_1, a_1, b_2, a_2 – параметри конструкції ТАВ та поточних ВП;

T_0 – константа початкової температури палива ТП 6.

Другий доданок (5.1) впливає лише поблизу НЕ 3 в точці з координатою $x = 0$, отже, цим доданком можна знехтувати за умови, що мінімальна відстань x_{min} від груп 4, 5 ТП до НЕ 3:

$$b_2 e^{-a_2 x} \approx 0. \tag{5.2}$$

З урахуванням компенсації впливу початкової температури палива, за допомогою (5.1), отримаємо:

$$T_1(x) = T(x) - T_0, \tag{5.3}$$

$$ln\, T_1(x) = B_1 - a_1 x, \tag{5.4}$$

де $B_1 = \ln \underline{b}_1$, $x \geq x_{\min}$

Завдяки обчисленню логарифма можна отримати залежність між температурою в кожній точці потоку палива та відстанню до НЕ 3 в лінійному вигляді.

Отримані значення температури $T^*(x_i)$ у запропонованому ТАВ надходять у БЛ 7 від груп 4, 5 ТП, де x_i – відстань від і-го ТП в групі 4 або 5 до НЕ 3. Значення температури T_0^* палива надходить у БЛ 7 від ТП 6.

Отже, на основі (5.3):

$$T_0^*(x_i) = T^*(x_i) - T_0^*, \tag{5.5}$$

де $x_i \geq x_{min}$

Обчислення значень $lnT_1^*(x_i)$ з компенсацією впливу початкової температури палива, згідно з (5.4), виконує БЛ 7.

Блок 8 ЛА на основі значень $lnT_1^*(x_i)$ обчислює оцінки B_1' та a_1' параметрів B_1 та a_1, що входять до складу (5.4), наприклад, методом найменших квадратів. Отже, завдяки процедурі ЛА, суттєво зменшується вплив випадкових ПВ температури на загальну точність вимірювання ВП. БО 9 ВП визначає поточні швидкості потоку палива (витрати). Для цього в зазначеному блоці обчислюють температури $T_1'(x_i)$ в точках потоку, які є уточненими за результатми ЛА, що отримані в блоці 8 ЛА. Водночас, на основі (5.4):

$$C_i = lnT_1'(x_i) = B_1' - a_1'x_i,$$
$$T_1'(x_i) = e^{C_i}. \tag{5.6}$$

Далі обчислюють швидкість потоку, його об’ємну (масову) витрату за допомогою формул [31, 32].

З метою підвищення точності вимірювань запропоновано обчислювати ряди значень швидкості та ВП для значень температур в точках x_i з наступним усередненням їх значень.

Додатково для визначення витрати в блоці 9 запропоновано використання аналітичного розрахунку параметрів b_1 та a_1 або отримання їх значень градуюванням

З метою перевірки працездатності запропонованих рішень та конструкції ТАВ досліджено його діючий зразок з такими параметрами: трубка металева, діаметром 20 мм та довжиною 400 мм; ДЖ постійного струму з вихідною напругою 12 В; НЕ з дроту Х20Н80 у вигляді котушки циліндричної форми; ТП – КТ342.

ТП в групах розташовано так: відстань до першого ТП від НЕ в групі – 3 см, до останнього – 8 см, крок між ТП однаковий.

Характеристики досліджувалися в діапазоні швидкостей потоку відповідно до ВП ДВЗ.

З метою порівняння запропонованого витратоміра з ТАВ-прототипом на початку в конструкції використовували по одному ТП кожної з груп 4, 5 ТП. Задіяні ТП знаходилися на відстані 8 см від НЕ 3 для великих ВП, а для малих – на відстані 3 см. Далі використовували всі ТП в групах 4, 5. Як підсумок досліджень: встановлено, що ПВВП у запропонованому ТАВ, порівняно з ТАВ-прототипом, зменшилася у 1,2–1,4 раза.

Отже, ТАВ з цифровою обробкою ВІ забезпечує підвищення точності вимірювань ВП.

5.3 Витратоміри біопалив з підвищеною точністю вимірювання

Розроблено два витратоміри з підвищеною точністю вимірювання [33, 34].

Впровадження засобів та технологій енергозбереження на АТ зумовлюють специфічні вимоги до засобів вимірювання, вимагають їх удосконалення, розробки нових технічних і технологічних ріщень, зокрема для зменшення похибок вимірювання.

За прототип ТАВ, що пропонується, вибрано відомий ТАВ з підвищеною точністю вимірювання [32].

ТАВ-прототип має в своєму складі послідовно поєднані БВ, логарифмування ЛА та обчислення ВП, трубку з ППП, в якій розміщений НЕ ППП, з розташуванням по різні боки двох груп ТП ППП, в кожній з цих шруп ТП ППП розташовані на заданих відстанях від НЕ ППП, за зоною дії якого розміщений ТП ППП, трубку зі ЗПП, в якій розміщений НЕ ЗПП, з розташуванням по різних боках двох груп ТП ЗПП, в кожній з яких ТП ЗПП встановлено на заданих відстанях від НЕ ЗПП, поза зоною дії якого розміщений ТП ЗПП, а однойменні виходи груп ТП ППП та ТП ЗПП під’єднано попарно до входів БВ.

В ТАВ-прототипі виходи ТП прямого та ЗПП з’єднано з входами БВ, що хоч дозволяє вимірювати ВП ДВЗ з системами ЗЗП в бак та підвищує точність вимірювання ВП, але не враховує різницю температур на входах ППП та ЗПП, коли паливо, що надходить в ТАВ з паливного насоса ДВЗ, підігрівається додатково. Якщо врахувати, що температура у системі змащування паливного насоса високого тиску дизеля сягає десятків градусів, можна дійти висновку, що паливний насос високого тиску змінює температуру палива, яке проходить крізь нього, суттєво.

Крім того, для різних значень витрат у паливі, що проходить через ТАВ, спостерігаються нерівномірності швидкостей, що збільшуються НЕ прямого та ЗПП. Більшою мірою це відбувається в ДП з домішками ОРП, оскільки таке паливо має іншу, відносно ДП, теплопровідність, в’язкість, густину тощо.

Ці обставини зумовлюють наявність різного виду похибок: температурної, в’язкого тертя потоку, які є неоднаковими та залежать від поточних значень температур палива на входах у трубки прямого та ЗПП. Отже, відсутність засобів регулювання температур на входах прямого та ЗПП призводить до збільшення загальної ПВВП у прототипа.

Так виникає задача удосконалення ТАВ з підвищеною точністю вимірювань, що має в своєму складі послідовно з’єднані БВ, логарифмування, ЛА та обчислення ВП, трубку з ППП, в якій встановлено НЕ ППП, по різні боки від якого розташовані дві групи ТП ППП, в кожній з яких ТП ППП розташовані на певних відстанях від НЕ ППП, поза зоною дії якого розміщений ТП ППП, трубку зі ЗПП, в якій розміщений НЕ ЗПП, по різні боки якого також розташовано дві групи ТП ЗПП, в кожній з груп ТП ЗПП розташовані на заданих відстанях від НЕ ЗПП, поза зоною дії якого встановлено ТП ЗПП, причому однойменні виходи груп ТП ППП та ТП ЗПП під’єднано до відповідних входів БВ так, що введений БКТ, виходи якого з’єднані з входами вхідних НЕ ППП та НЕ ЗПП, що введені у трубку ППП та трубку ЗПП, відповідно, а входи БКТ – з виходами ТП ППП та ТП ЗПП, щоб забезпечити підвищення точності ВВ БП.

Введення БКТ, вхідних НЕ прямого та ЗПП, дає можливість регулювати температури палива на входах трубок прямого та ЗПП. За забезпечення однакових температур потоків на входах трубок прямого та ЗПП усувається вплив різниці цих температур прямого та ЗПП на ПВ. Водночас похибки в’язкого тертя та температурна повністю компенсуються, що зменшує загальну ПВВП, особливо витрат БП.

Запропонований ТАВ з підвищеною точністю вимірювання (рис. 5.3) містить БКТ 15, трубку 1 з ППП, трубку 2 зі ЗПП та

послідовно з'єднані БВ 16, логарифмування 17, ЛА 18, обчислення ВП 19.

В трубці 1 з ППП на вході ППП 3 встановлений НЕ 13. В середині трубки 1 з ППП палива розміщений НЕ 5, по різні боки якого розташовані групи ТП 7, 8. В кожній групі ТП встановлено на заданих відстанях x_i від НЕ 5, поза зоною дії якого розміщений ТП 11 з виконанням умов: $i=1, \ldots, N_1 + N_2$, *де* N_1, N_2 – кількість ТП в групах 7, 8 ТП.

В трубці 2 зі ЗПП на вході потоку 4 встановлено НЕ 14. Також, в середині трубки 2 розміщено НЕ 6, по різні боки від якого розташовано групи 9, 10 ТП, в кожній з яких ТП розташовані на заданих відстанях x_i від НЕ 6, поза зоною дії якого розміщено ТП 12 з виконанням умов: $I = 1,\ldots,N_1+N_2$, де N_1, N_2 – кількість ТП у групах 9, 10 ТП, що дорівнює кількості ТП ППП у групах 7, 8 ТП ППП, відповідно.

Виходи груп 7, 8 ТП та 9, 10 ТП під'єднано до входів БВ 16, вихід БВ 16 - до входу БЛ 17, вихід якого під'єднаний до входу блока ЛА 18, вихід якого – до входу БО 19 ВП, який є виходом ТАВ.

Виходи ТП 11 та 12 з'єднано з входами БКТ 15. Виходи БКТ 15 під'єднано до входів вхідного 13 та вхідного 14 НЕ.

ТАВ з підвищеною точністю вимірювання (див.рис. 5.3) працює так: ППП 3, витрати f_1 якого вимірюють, протікає по трубці 1 повз вхідний НЕ 13, ТП 11, НЕ 5 та групи ТП 7, 8; ЗПП 4, витрати f_2 якого також потрібно виміряти, протікає по трубці 2 повз НЕ 14, ТП 12, НЕ 6 та групи ТП 9, 10.

За цими ТП 11 та 12 БКТ 15 за допомогою НЕ 13 та 14 встановлює за допомогою енергії ДЖ (на рис. 5.3 не показано) однакову температуру потоків на входах трубок 1 та 2.

НЕ 5 та 6 підігрівають прямий 3 та ЗПП 4, створюючи в них поле температур, значення яких залежать від ВП f_1 та f_2 (швидкостей

потоків), відстаней від НЕ 5 до кожного ТП у групах 7, 8 та відстаней від НЕ 6 ЗПП до ТП у групах 9, 10 та збільшуються або зменшуються перед НЕ 5 та 6 за експоненціальним законом. За вказаними температурами, що створюються НЕ 5 та 6 і фіксуються групами 7, 8, 9, 10 ТП, визначається ВП у прямому 3 та ЗПП 4.

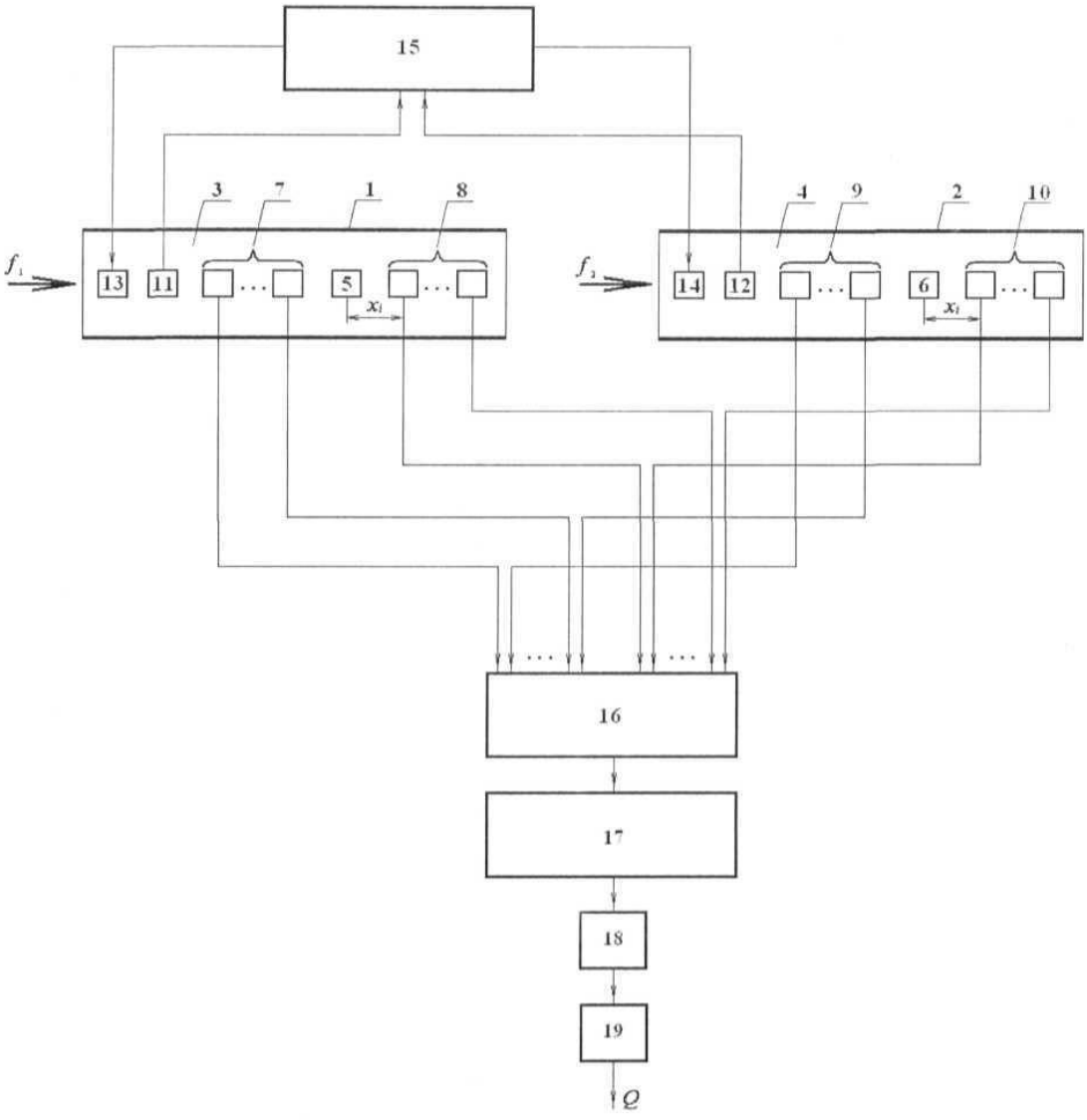


Рисунок 5.3 – Схема ТАВ з підвищеною точністю вимірювання:
1 – трубка з ППП; 2 – трубка з ЗПП; 3 – ППП; 4 – ЗПП; 5, 6 – НЕ;
7, 8 – групи ТП ППП; 9, 10 – групи ТП ЗПП; 11 – ТП ППП;
12 – ТП ЗПП; 13 – вхідний НЕ ППП; 14 – вхідний НЕ ЗПП; 15 – БКТ;
16 – БВ; 17 – БЛ; 18 – блок ЛА; 19 – БО ВП

Авторська розробка.

Результати вимірювання температури надходять на входи БВ 16, де обчислюється їх різниця між вказаними ТП для прямого 3 та ЗПП 4.

Виміряне значення ВП за наявністю похибок в ППП 3 визначається за формулою:

$$f_1 = Q_1 + \Delta_{T_1} + \Delta_{BT_1} + \Delta_{IH_1}, \quad (5.7)$$

де Q_1 – істинне значення ВП у ППП 3;

Δ_{T1}, Δ_{BT1}, Δ_{IH1} – похибки: температурна, сили в'язкого тертя та інші в ППП 3, відповідно.

Виміряне значення ВП, за наявності похибок у ЗПП 4, визначається за формулою:

$$f_2 = Q_2 + \Delta_{T_2} + \Delta_{BT_2} + \Delta_{IH_2}, \quad (5.8)$$

де Q_2 – істинне значення ВП у ППП 3;

Δ_{T2}, Δ_{BT2}, Δ_{IH2} – похибки температурна, сили в'язкого тертя та інші в ЗПП 4, відповідно.

Оскільки ВП АТЗ є різницею між (5.7) та (5.8), сумарні похибки температурна, сили в'язкого тертя та інші завжди зменшується. Внаслідок роботи БКТ 15, вхідного НЕ 13 та вхідного НЕ 14, температура ППП 3 та ЗПП 4 наближаються одна до одної:

$$\left|T_{\text{вх}_2} - T_{\text{вх}_1}\right| \to 0, \quad (5.9)$$

де $T_{\text{вх1}}$, $T_{\text{вх2}}$ – температури палива на входах трубки 1 трубки 2, відповідно.

Отже, для трубок 1 та 2 похибки температурна та сили в’язкого тертя зменшуються, що зменшує сумарні похибки температурну та сили в’язкого тертя ТАВ. Це підвищує точність вимірювання витрат БП.

Водночас ВП у ППП 3 завжди більша, ніж у ЗПП 4 або дорівнює їй. ВП ДВЗ визначається за формулою (5.10):

$$Q = f_1 - f_2 = Q_1 - Q_2 + \Delta_{T_1} - \Delta_{T_2} + \Delta_{BT_1} - \Delta_{BT_2} + \Delta_{H_1} - \Delta_{H_2}. \qquad (5.10)$$

Як видно з (5.10), відбувається зменшення похибок температурної та сили в’язкого тертя, отже, зменшення сумарної похибки вимірювання ВП.

Далі результати обчисленої різниці температур ТП прямого 3 та ЗПП 4 надходять на вхід БЛ 17, де отримуються значення *T(x)* температур у точках потоку палива залежно від відстані *x* цієї точки до НЕ 5 та 6 в трубках 1 та 2.

З БЛ 17 дані надходять на вхід блока ЛА 18, який проводить апроксимацію залежності *T(x)*. БО 19 ВП визначає значення швидкості потоку БП (витрати) з урахуванням конструктивних параметрів ТАВ, наприклад, діаметрів НЕ, трубок тощо. Значення ВП розраховують за відомими формулами.

Для перевірки працездатності запропонованого ТАВ був створений його дослідний зразок. Використано металеві трубки 1 та 2 діаметром 20 мм та довжиною 400 мм, ДЖ – блок живлення Б5–7 з вихідною напругою 12 В. НЕ 5, 6, 13 та 14 були виготовлені з дроту Х20Н80 у вигляді циліндричних котушок.

У дослідному зразку ТАВ використано по сім ТП (транзистори КТ342) у кожній групі 7, 8, 9 та 10. Відстань від НЕ 5 та 6 до першого ТП в групах дорівнювала 3 см, до останнього – 8 см. В процесі дослідження обирався діапазон ВП ДВЗ для всього можливого

діапазону швидкісних та навантажувальних режимів його роботи на дизельному паливі.

Пропоноване порівняння ТАВ з прототипом на першому етапі проводили вимірюванням ВП без використання БКТ 15. На другому етапі – додатково вмикали БКТ 15, який на основі даних ТП 11 та 12 за допомогою НЕ 13 та 14 підтримував однаковими температури палива на входах трубок 1 та 2.

У підсумку проведених досліджень встановлено, що розроблений ТАВ, порівняно з його прототипом, має меншу ПВ на 7–13 %.

Прототип другого ТАВ з підвищеною точністю вимірювання ВП має послідовно з’єднані блоки ЛА та БО ВП, трубку з ППП з встановленим в неї НЕ, по різні боки якого розташовані групи ТП, в кожній з яких ТП розташовано на заданих відстанях від НЕ, поза зоною дії якого розміщений ТП.

Але існуючий ТАВ має три послідовно з’єднані блоки: логарифмування, ЛА та обчислення ВП та одну трубку з ППП, в якій розміщений НЕ ППП, по різні боки якого розташовані дві групи ТП, в кожній з яких ТП розташовано на заданих відстанях від НЕ ППП, поза зоною дії якого розміщений ТП. Така конструкція не дозволяє вимірювати ВП ДВЗ з системами ЗЗП в бак.

Важливо, що в потоці палива практично завжди мають місце локальні збурування швидкостей (відповідно, і температур), що відвищує НЕ ППП. Ці процеси активно відбуваються в ДП з домішками ОРП, оскільки вони мають іншу, відносно ДП, в’язкість, теплопровідність та густину. Вищенаведене зумовлює наявність похибок температурної, сили тяжіння, в’язкого тертя, струмопідведення тощо, а відсутність засобів компенсації вказаних похибок призводить до збільшення загальної ПВВП, особливо БП.

Отже, вказаний ТАВ має обмежене застосування для вимірювання ВП з системами ЗЗП в бак, відносно низьку точність вимірювання витрат БП. Тому виникає задача удосконалення існуючого ТАВ палива з цифровою обробкою ВІ, що має послідовно встановлені БЛ, ЛА та обчислення ВП, трубку з ППП з НЕ, по різні боки якого розташовано групи ТП, в кожній з яких ТП розташовано на заданих відстанях від НЕ, поза зоною дії якого встановлено ТП, додатково введені БВ та трубка зі ЗПП, в якій розміщений НЕ, по різні боки якого розташовані дві групи ТП, в кожній з яких ТП розташовані послідовно на заданих відстанях від НЕ, поза зоною дії якого розміщений ТП, а виходи ТП ППП та ТП ЗПП, а також однойменні виходи груп ТП ППП груп ТП ЗПП під'єднані попарно до входів БВ, вихід якого з'єднаний зі входом БЛ, щоб забезпечити вимірювання ВП ДВЗ з системами ЗЗП в бак та підвищити точність вимірювання ВП.

Завдяки введенню БВ та трубки зі ЗПП забезпечується можливість вимірювання ВП ДВЗ з системами ЗПП в бак. Це одночасно дає змогу зменшити похибки температурну, струмопідведення, сили тяжіння та в'язкого тертя, що суттєво впливає на підвищення точності вимірювання ВП.

ТАВ з підвищеною точністю вимірювання ВП складається з БВ 13, БЛ 14, блока ЛА 15, БО витрат16, трубки 1 з ППП 3 та трубки 2 зі ЗПП 4 (рис. 5.4).

В трубці 1 розміщений НЕ 5, по різні боки від якого розташовано групи 7, 8 ТП, в кожній з яких ТП розташовано на заданих відстанях x_i від НЕ 5, поза зоною дії якого встановлено ТП 11 з виконанням умов: $i = 1, \ldots, N_1 + N_2$, де N_1, N_2 – кількість ТП в групах 7, 8 ТП.

В трубці 2 розміщений НЕ 6, по різні боки якого розташовано групи 9, 10 ТП, в кожній з яких ТП розташовано на заданих відстанях x_i від НЕ 6, поза зоною дії якого розміщено ТП 12. Умови

встановлення аналогічні: $i = 1, \ldots, N_1 + N_2$, де N_1, N_2 – кількість ТП в групах 9, 10 ТП, що дорівнює кількості ТП в групах 7, 8.

Виходи ТП 11 та ТП 12, а також виходи груп 7, 8, 9 та ТП під'єднано попарно до входів БВ 13. Вихід БВ 13 під'єднано до входу БЛ 14, вихід якого – до входу блока ЛА 15, а його вихід – до входу БО 16 ВП, який є виходом ТАВ.

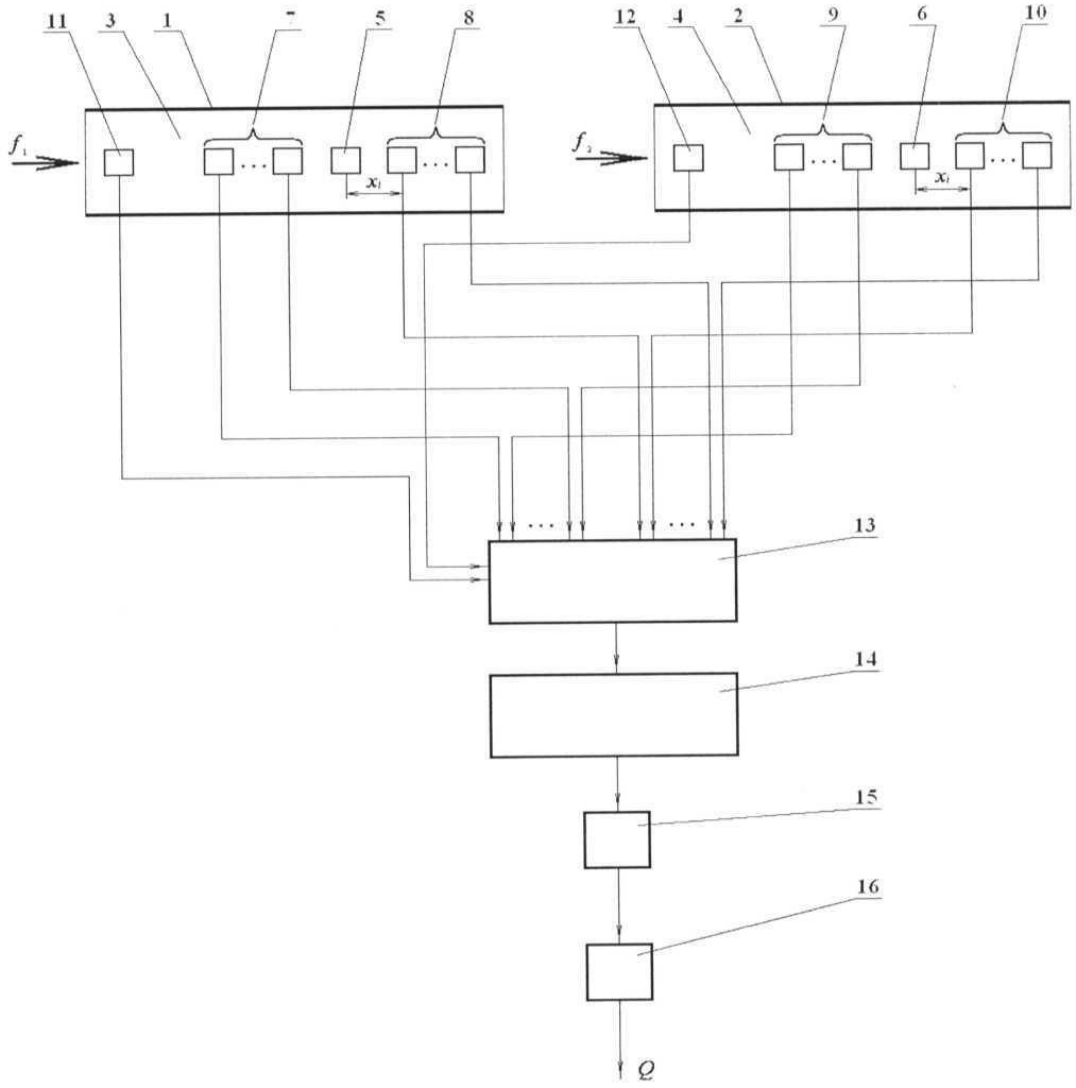


Рисунок 5.4 – ТАВ з підвищеною точністю вимірювання: 1 – трубка з ППП; 2 – трубка зі ЗПП; 3 – ППП; 4 – ЗПП; 5, 6 – НЕ; 7, 8 – групи ТП ППП; 9, 10 – групи ТП ЗПП; 11, 12 – ТП; 13 – БВ; 14 – БЛ; 15 – ЛА; 16 – БО ВП

Авторська розробка.

Запропонований ТАВ працює так: ППП, витрати f_1 якого вимірюються, протікає по трубці 1 повз ТП 11, НЕ 5 та груп 7, 8 ТП. ЗПП 4, витрати f_2 якого також вимірюються, протікає по трубці 2 повз ТП 12, НЕ 6 та групи 9, 10 ТП. НЕ 5 та 6 за рахунок енергії ДЖ (на схемі не показаний) підігрівають прямий 3 та ЗПП 4, створюють в них потрібне поле температур, значення яких залежать від ВП f_1 та f_2 (швидкостей потоків), відстаней від НЕ 5 та 6 до кожного з ТП в групах 7, 8 та 9, 10 та змінюються перед НЕ 5 та 6 та після НЕ 5 та 6 за експоненціальним законом. Водночас за температурами палива, що створюються НЕ 5 та 6 і фіксуються групами ТП 7, 8 та 9, 10, визначають ВП в прямому 3 та ЗПП 4.

Результати вимірювання температур палива в зонах дії НЕ 5 6 з виходів ТП 11 та 12, однойменних виходів груп 7, 8, 9 та 10 ТП надходять на входи БВ 13, де обчислюється різниця температур між ТП для прямого 3 і ЗПП 4.

Виміряне значення ВП за наявністю похибок в ППП 3 визначають:

$$f_1 = Q_1 + \Delta_{T_1} + \Delta_{\text{СТ}_1} + \Delta_{\text{СП}_1} + \Delta_{\text{ВТ}_1}, \qquad (5.11)$$

де Q_1 – істинне значення ВП в ППП 3;

Δ_{T1}, Δ_{CT1}, $\Delta_{CП1}$, Δ_{BT1} – похибки: температурна, сили тяжіння, струмопідведення та сили в'язкого тертя в ППП 3.

Виміряне значення ВП за наявності похибок в ЗПП 4 визначається:

$$f_2 = Q_2 + \Delta_{T_2} + \Delta_{\text{СТ}_2} + \Delta_{\text{СП}_2} + \Delta_{\text{ВТ}_2}, \qquad (5.12)$$

де Q_2 – істинне значення ВП в ЗПП 4;

Δ_{T2}, Δ_{CT2}, $\Delta_{СП2}$, $\Delta_{ВТ2}$ – похибки: температурна, сили тяжіння, струмопідведення та сили в'язкого тертя в ЗПП 4.

Істинною ВП ДВЗ є різниця між (5.11) та (5.12). Отже, сумарна похибка (що охоплює похибки: температурну, сили тяжіння, струмопідведення та в'язкого тертя) зменшується завжди. При цьому ВП в ППП 3 завжди більша, ніж в ЗПП 4. ВП ДВЗ складає:

$$Q = f_1 - f_2 = Q_1 - Q_2 + \Delta_{T1} - \Delta_{T2} + \Delta_{CT1} - \Delta_{CT2} + \Delta_{\text{СП1}} - \Delta_{\text{СП2}} + \\ + \Delta_{\text{ВТ1}} - \Delta_{\text{ВТ2}} \qquad (5.13)$$

З (5.13) отримуємо зменшення значень похибок: температурної, сили тяжіння, струмопідведення та сили в'язкого тертя, що, в кінцевому підсумку, дає зменшення сумарної ПВВП.

Далі результати обчисленої різниці температур ТП прямого 3 та ЗПП 4 надходять на вхід БЛ 14, де визначаються значення функції *T(x)* температури у вибраній точці потоку залежно від відстані *x* точки розрахунку температури до НЕ 5 трубки 1 та НЕ 6 трубки 2.

З БЛ 14 дані подаються на вхід блока ЛА 15, який проводить апроксимацію залежності *T(x)*. БО 16 ВП визначає відповідні швидкості потоку палива (витрату) з урахуванням конкретних значень конструктивних параметрів ТАВ, наприклад, площі перерізу трубок 1 та 2. Далі за відомими залежностіми обраховують об'ємну та масову ВП.

Для перевірки працездатності пропонованого ТАВ було досліджено його діючий зразок з такими особливостями конструкції: трубки 1 та 2 металеві, зовнішній діаметр 20 мм, довжина 400 мм; ДЖ – блок живлення марки Б5-47 з вихідною напругою 12 В; НЕ 5 та 6 виготовлені з ніхрому Х20Н80 у вигляді котушок циліндричної форми; ТП у кожній групі 7, 8 ,9 та 10 (по 7 штук транзисторів КТ342).

Відстань від НЕ 5 до першого ТП в групах 7, 8 мала значення 3 см, до останнього – 8 см. Аналогічно, відстань від НЕ 6 до першого ТП в групах 9, 10 – 3 см, до останнього – 8 см.

Характеристики ТАВ досліджувалися на діючому макеті для діапазону ВП ДВЗ на всіх можливих навантажувальних та швидкісних режимах його роботи на дизельному паливі.

З метою порівняння розробленого ТАВ з прототипом проводили вимірювання ВП ТАВ з трубкою 1 ППП, кількість надходження якого до бака через систему ЗЗП визначали об'ємним способом. Після цього використовували трубки 1 ППП та 2 ЗПП, які встановлювалися в прямий 3 та ЗПП 4.

За результатами дослідження встановлено, що ПВВП розробленого ТАВ зменшується на 12–19% порівняно з ТАВ-прототипом.

Отже, пропонований ТАВ не тільки прийнятний до використання в ДВЗ з ситемою ЗЗП в бак (магістраллю повернення палива в бак), а також забезпечує підвищення точності вимірювання ВП.

5.4 Шляхи удосконалення термоанемометричних витратомірів біопалив

ВП є важливим показником технічного стану АТЗ в цілому. Вимірювання ВП також є важливими в експлуатації АТЗ для своєчасного визначення несправностей та запобігання відмов. Важливо проводити контроль ВП в реальному часі, оперативно реагувати на їх необгрунтовані збільшення.

ВП – одна з надважливих статей собівартості транспортної роботи, а ВВ є необхідними для планування маршрутів руху, обліку витрат та фактичної роботи на маршруті тощо.

В більшості випадків на АТЗ не мають в конструкції витратомірів палив. Замість цього використовують програмну реєстрацію часу відкритого стану інжекторів (форсунок) ДВЗ, за тиском перед якими та з урахуванням їх конструктивних параметрів розраховують кількість палива, що пройшло через форсунку. Отже, дані ВВ можна віднести до наближених та відносних, оскільки вони не відображають повну картину ВП. Особливо треба мати на увазі, що ПВ буває значною і залежатиме, наприклад, від технічнгого стану елементів системи живлення ДВЗ. За абсолютну ВП в таких системах приймається сума кожної такої реєстрації параметрів відкритого стану інжекторів на маршруті руху АТЗ.

В процесі експлуатації користувача АТЗ більше цікавить значення абсолютної ВП (за період, на маршруті, в режимах завантаження тощо). Однак абсолютна ВП може значно відрізнятись від виміряної звичайною реєстрацією часу відкриття інжекторів.

На АТ можна використовувати витратоміри палив різних типів, конструкцій та принципів дії. Але специфіка роботи ТЗ висуває багато принципових вимог до витратомірів.

Наприклад, витратоміри палива OGM [140] – витіснювального принцтпу дії, прецизійні, в конструкцію яких введено два овальні ротори (овальні шестерні). Принцип дії витратоміра полягає в обертанні зачеплених між собою шестерень, які, під дією потоку палива, пропускають за один оберт визначений об’єм палива. Підрахунком кількості обертів визначають ВП.

Переваги цього способу – відносно висока точність ВВ, низькі вимоги до геометрії трубопроводів за діаметром, довжиною прямих ділянок, кривизни тощо. Витратоміри зазначеного принципу дії мають високу надійність, що дозволяє використовувати їх для вимірювання витрат рідких палив та експлуатаційних рідин. Важливо, що такий витратомір здатний вимірювати кількість палива, що подається як

самопливом, так і/або під тиском. Виробник вказує на такі переваги приладу: точність ВВ з максимальною похибкою ±0,5%, компактність, простота експлуатації тощо.

Але в такій конструкції витратоміра на точність вимірювання ВП впливають фактори: тертя в опорах роторів, пульсації тиску палива, розташування витратоміра на АТЗ та відносно горизонту.

Одночасно з цим виробник зазначає, що такий прилад рекомендовано до використання лише для внутрішньогосподарського обліку палив, що, можливо, пов’язано зі стаціонарними режимами його роботи, та неможливість гарантовано забезпечувати необхідну точність в умовах работи АТЗ.

Промисловість пропонує велике різноманіття витратомірів палива. Але, як показує їх аналіз, вони не адаптовані для роботи на АТЗ, тому найбільш привабливими сьогодні вважаються витратоміри, принцип дії яких базується на реєстрації перенесення тепла тілом, витрата якого реєструється [29, 48]. Такі витратоміри мають важливі переваги відносно інших. Важливими з них є: на точність ВВ не впливає орієнтація витратоміра відносно горизонту, на ПВ не впливають вібрації приладу під час руху, ударні навантаження тощо, пульсації та тиск палива на вході у витратомір. Але суттєвими недоліками таких витратомірів є: відносно вузький діапазон вимірювання ВП; вони орієнтовані на стаціонарні значення витрат; мають непостійну ПВ витрат для різних значень швидкостей потоку палива [141]. Ці фактори потребують врахування в процесі вимірювання, а витратоміри – вдосконалення конструкції, що може бути реалізовано різними рішеннями.

Цілком можливим вважається розробити шляхи зменшення ПВВП ДВЗ АТЗ за допомогою ТАВ через удосконалення його конструкції.

Класична конструкція ТАВ є наступною: він складається з трубки з потоком палива, НЕ та ТП. Розміри трубки вибираються залежно від максимально можливої ВП та заданої її міцності, що враховуються в процесі розробки витратоміра, або вони наводяться в технічному паспорті на готовий витратомір. Трубка виготовляється з різних матеріалів, але в процесі розробки витратоміра потрібно врахувати теплопровідність матеріалу, технологічність механічної обробки тощо. Теплопровідність матеріалу трубки ТАВ впливатиме на показники передачі тепла від палива (на величину РТП) в процесі вимірювання ВП. Причому кількість тепла на різних швидкостях потоку палива буде різною, що впливатиме на ПВВП. Для зменшення теплообміну між трубкою і НС важливо обирати такий матеріал трубки, що має меншу теплопровідність для зменшення варіації показників РТП, втрати тепла в атмосферу, що також зменшить ПВВП.

Вище зазначалося, що трубка ТАВ має певну пропускну спроможність для забезпечення максимально можливої ВП ДВЗ, Отже, її внутрішній діаметр має бути більшим за певну величину для забезпечення пропускної спроможності витратоміра в цілому. Товщина стінки трубки ТАВ та її матеріал мають забезпечувати задану міцність без руйнування, втрат герметичності тощо. Матеріал трубки має забезпечувати потрібне значення коефіцієнта лінійного розширення, оскільки АТЗ працюють в широкому діапазоні температур НС. Так, наприклад, автомобіль КрАЗ-6510-030 розрахований на експлуатацію за температур НС -45 … +50 °С [142]. В усьому діапазоні вказаних температур трубка ТАВ не має змінювати свої геометричні розміри або їх зміна має бути мінімальною, що можна врахувати програмним способом в процесах використання ТАВ з ком’ютерним поєднанням.

Для зменшення РТП рекомендовано до використання теплоізоляцію і/або використання відповідних матеріалів. Також ці матеріали мають бути стійкими до агресивного впливу не лише НС, але й самого палива, наприклад, фторопласти.

Фторопласт Ф-4 – це кристалічний полімер, що має температуру плавлення кристалітів 327 °С, температуру склування аморфних ділянок -100…-120 °С. За температур вище температури розкладання (415 °С) фторопласт Ф-4 не переходить у в'язкотекучий стан, а за температури 370 °С в'язкість його розплаву дорівнює приблизно 1011 П, що в 10^6 разів більше в'язкості, необхідної для лиття під тиском.

Для врахування змін показників теплового потоку для різних матеріалів трубки ТАВ, а також для ВВ різних палив важливо аналізувати властивості їх матеріалів щодо передачі тепла, що фарактеризується коефіцієнтом теплопровідності (табл. 5.1).

З табл. 5.1 видно, що коефіцієнти теплопровідності рідких нафтових палив мають суттєво менші значення, порівнянj з матеріалами трубки ТАВ. Для максимального усунення впливу теплопровідності матеріалу трубки 1 ТАВ на РТП (на ПВВП) потрібно вибирати матеріали з коефіцієнтом теплопровідності, за якого передача тепла в радіальному напрямку повністю унеможливлюється, що може бути виключно теоретично. Отже, повне усунення передачі тепла в радіальному напрямку вибором матеріалу трубки ТАВ і/або ізоляції неможливе.

НЕ підігріває потік палива до необхідної температури (за умов безпеки не перевищує температури спалаху). Відомо, що чим вища температура кипіння нафтопродуктів, тим вища їх температура спалахування. Температура спалахування показує наявність в паливі легколетучих фракцій і вказує рівень пожежонебезпечності та вибухонебезпечності нафтопродуктів. Фактично температура

спалахування – це температура початку горіння. Українські стандарти зазначають межу температури спалахування 61 ºС, нижче значень якої палива відносять до легкозаймистих, вище – до горючих рідин.

Таблиця 5.1 – Теплопровідність рідких нафтових палив, матеріалів трубки та ізоляційних матеріалів ТАВ, t = 20 ºС [71, 72]

Матеріал/паливо	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)
Паливо	
ДП	0,108
Бензин	0,106
Трубка і/або ізоляція	
Дюралюміній	160
Латунь	110
Фторопласт Ф-5	0,25

Важливо розуміти, що в трубці ТАВ повітря відсутнє і утворення ППС неможливе. Паливо знаходиться під тиском, що утворює паливний насос системи живлення ДВЗ, а в разі його зупинки в системі цей тиск залишається вище за атмосферний для запобання підтіканню палива (потраплянню повітря в паливні магістралі).

Отже, нагрівання палив до температур вищих за температуру спалахування можливе, але коли нагріте паливо буде спрямовано в циліндр ДВЗ і буде контактувати з повітрям, відбудеться небажане некероване самоспалахування, тому для подальшого аналізу можна брати за розрахункове значення температуру спалахування в закритому тиглі і/або кипіння. Для ДП температура кипіння дорівнює 170 … 380 °С [145]. Оскільки ці значення наведено в довідковій літературі за нормальних атмосферних умов, можна вважати за можливе підігрівати його в ТАВ до 170 °С.

НЕ конструктивно може виготовлятися різної геометричної форми, але частіше він виготовляється з дроту ніхрому та встановлюється аксіально з віссю трубки ТАВ та має форму спіралі відносно малого (рис. 4.15) або відносно великого (рис. 4.16) радіусів, що змінює параметри радіального і осьового теплових потоків, що потребує додаткового дослідження.

НЕ може встановлюватись на зовнішню поверхню трубки ТАВ. Це полегшує підведення до нього електричного струму , але створює інший розподіл температур внаслідок зміни величини та напряму РТП в паливі.

Також ТП в більшості випадків розташовують вздовж осі трубки. ТП бувають різних принципів дії, типів тощо. Розподіл температур, що реєструють ТП, є вхідною інформацією для розрахунку швидкостей потоку палива (його витрати), які є взаємопо’вязаними, з якої логічно зробити висновок, що для певної об’ємної ВП зі зменшенням площі перерізу S трубки ТАВ пропорційно зростає швидкість потоку палива V і навпаки, збільшення площі перерізу S пропорційно знижує швидкість потоку, що дає можливість коригувати показники температур потоку за різних значень його швидкостей (витрати).

На загальну картину розподілу температур потоку палива для заданої його витрати впливає кількість ТП та вибрана відстань між ними, а також впливає відстань від НЕ до першого ТП. Вибрані відстані залежать від діапазону швидкостей, що вимірюються в ТАВ. Для сучасних ДВЗ вказаний діапазон може бути значним – від нуля в режимі примусового холостого ходу ДВЗ до максимального значення, відповідно максимальній миттєвій ВП ДВЗ. Оцінні розрахунки показують, наприклад, для ВП від 0,05 … 0,25 м^3/год швидкість руху палива в трубках діаметрами 0,01 … 0,1 м складатиме 1,77 … 884,6 мм/с. Зазначений діапазон швидкостей потребує розробки таких

конструктивних рішень, які б давали можливість реєстрації миттєвих значень температур палива в заданий момент часу з необхідною точністю.

Неважко дійти висновку, що параметри процесу перенесення тепла в радіальному та в осьовому напрямках трубки ТАВ на різних швидкостях палива будуть значно відрізнятись, що, в окремих випадках, дасть можливість вимірювати температури в точках розташування ТП та розраховувати швидкість потоку палива (витрату). Наприклад, за збільшення швидкості палива (витрати) для певних значень ТП може бути зареєстровано температуру, яка практично не відрізняється від температури, що реєструють два послідовно встановлених ТП. Це означає досягнення швидкості потоку палива критичних значень, вище за яких визначення різниці температур неможливе. Отже, для зменшення ПВВП на заданому режимі роботи ДВЗ потрібно брати до уваги температури двох сусідніх ТП, що мають найбільшу різницю показів для всіх послідовно встановлених ТП 3 ТАВ. Постає завдання: в процесі вимірювання впливати на швидкість потоку палива для конкретних значень діапазону його витрат. Це наводить на думку використання трубки ТАВ іншого діаметра. Отже, ТАВ (рис. 5.5) має обмеження щодо діапазону вимірювання ВП.

Розширення діапазону вимірювання ВП (зменшення ПВ) можна отримати встановленням послідовно декількох трубок 1 різних діаметрів, кількість яких вибирається залежно від вимірюваного діапазону ВП (рис. 5.5). Така конструкція складається з трубок 1 послідовно встановлених та з’єднаних конусами 2 (наприклад, чотири трубки).

Значення конусності конусів 2 мають усувати (мінімізувати) появу збурень швидкостей потоку палива на всіх можливих

швидкостях його руху через всі трубки, що вимагає додаткових досліджень.

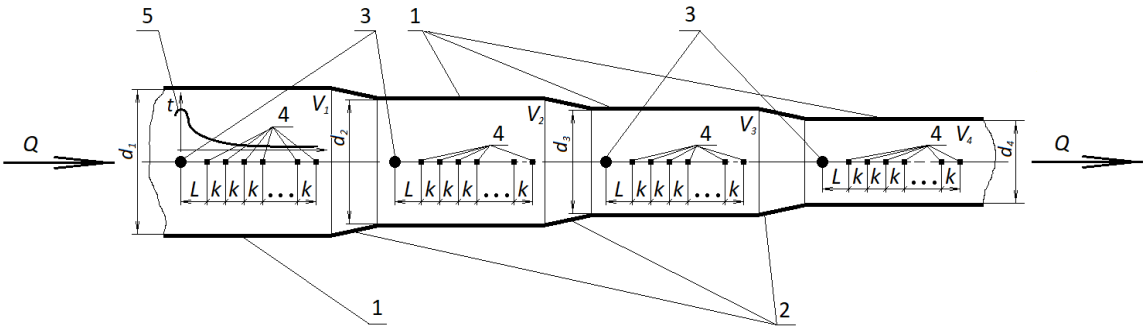


Рисунок 5.5 – Багатоступінчастий ТАВ [54]:
1 – трубка; 2 – конус; 3 – НЕ; 4 – ТП; 5 – температура вздовж осі трубки, °С; Q – об’ємна ВП, м^3/с; d_1–d_4 – діаметри трубок; V_1–V_4 – швидкості палива вздовж осей трубок, м/с; L – відстань від НЕ до першого ТП, м; k – відстані між ТП, м

Авторська розробка.

Використання трубок 1 діаметрів d_1–d_4 дозволяє змінювати швидкість потоку палива через трубки ТАВ, впливати на температуру його нагріву в більшому діапазоні ВП. Такий підхід дозволяє реєструвати максимально можливі різниці температур палива в потоці за допомогою одного ТП 4 до наступного, що розташовуються в потоці на відстані k.

Правильним вибором діаметрів d_1–d_4 трубок 1 досягається взаємне перекриття широкого діапазону вимірюваних ВП. Такі діаметри вибирають на основі міркувань: закон безперервності потоку рідини за умови встановлення, наприклад, таких співвідношень $d_4 = d_3/2 = d_2/4 = d_1/8$, дозволяє отримати швидкість V_4 в 64 рази більшу за швидкість V_1. Отже, вибором кількості трубок ТАВ та співвідношенням їх діаметрів можна охопити весь можливий діапазон ВП ДВЗ практично будь-якої потужності АТЗ.

В загальному вигляді формула визначення співвідношень діаметрів трубок багатосекційного ТАВ і швидкостей потоку палива має вигляд:

$$\frac{V_i}{V_{i+1}} = \left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right)^2, \qquad (5.14)$$

де $i = (1 \ldots n\text{-}1)$ – порядковий номер трубки ТАВ в напрямку руху палива;

n – кількість трубок ТАВ.

ТП 4 та НЕ 3 встановлюються аксіально з трубками 1. Перший в потоці палива ТП 4 розташовано на відстані L від НЕ 3, відстань від якого до наступного ТП 4 та далі між наступними ТП дорівнює k (рис. 5.6). Кількість ТП залежить від величини витрати Q і вибирається так, щоб можна було за їх показами відтворити розподіл температур по осі кожної трубки 1 з максимально можливою різницею температур між всіма сусідніми ТП. Вже згадувалось, що для значення ВП Q його швидкість руху вздовж осі трубки (V_1 - V_4) буде тим вища, чим більше значення Q і/або менший діаметр (d_1 - d_4).

Зі збільшенням швидкості потоку палива в трубці 1 ТАВ ТП 4 будуть реєструвати все більш однакову температуру, а після встановлення швидкого теплоперенесення покази ТП 4 не будуть суттєво відрізнятись, і вони будуть наближатись до температури палива біля НЕ 3. Відсутність (зменшення) різниці показів між сусідніми ТП 4 підвищує ПВ температури (ПВВП) або взагалі робить неможливим визначати різницю температур (витрату). Тоді можна запропонувати зменшити швидкість палива, що в нашому випадку може спостерігатись в трубках 1 більшого діаметра. І навпаки, зі зменшенням швидкості руху палива уповільнюється

теплоперенесення, ТП 4 можуть зареєструвати несуттєву зміну температури потоку, що також призведе до збільшення ПВВП. В цьому випадку є необхідним збільшити швидкість палива, що в запропонованій конструкції витратоміра може спостерігатись в трубках 1 меншого діаметра. Так не тільки розширюється діапазон вимірювання ВП, але і зменшується ПВ витрат рідких палив ТАВ.

Щоб отримати за заданою ВП розподіл температур потоку з максимальною інформативністю (з найбільшою різницею між сусідніми ТП 4), тобто для зменшення ПВВП, потрібно вибрати для аналізу розподілу температур трубку 1 ТАВ, де він наближається до вигляду:

$$\sum_{y=1}^{x}(|t_y - t_{y+1}|) \rightarrow max, \qquad (5.15)$$

де *x* – кількість ТП в трубці 1 ТАВ;

y – номер ТП потоку палива, *y=1 … x-1*;

t – температура, що зареєстровано ТП *y*.

ВП ДВЗ АТЗ на різних режимах його роботи є постійною, збільшується або зменшується, а знак модуля в (5.15) дає можливість проаналізувати саме величину різниць температур між двома сусідніми ТП. В трубці ТАВ, де виконується (5.15), тобто має місце розподіл виміряних температур з максимальною різницею між всіма сусідніми ТП, буде отримана найбільша інформативність процесу зміни швидкостей потоку палива (ВП).

Окремо потребує уваги перевірка турбулентності руху потоку палива в трубках ТАВ, оскільки вона впливатиме на різницю температур в (5.15), тобто на інформативність приладу. Наявність такого руху сприятиме зменшенню різниць температур між сусідніми

ТП. Турбулентний рух потоку також може мати місце в окремих режимах руху палива та вносити непостійну ПВВП.

Висновки до розділу 5

1. Аналіз існуючих конструкцій та принципу дії ТАВ показав, що вони найбільш відповідають вимогам щодо їх використання на АТ, зокрема для вимірювання витрат БП і для вимірювання ВП для ДВЗ, зокрема і з АС.

2. Розроблено:

- високоточний витратомір БП з цифровою обробкою ВІ, який за умови корекції ДНП та врахування поточних значень ФХВ палива дозволяє підвищити точність вимірювань ВП у 1,5 ... 1,8 раза;
- калориметричний витратомір БП з цифровою обробкою ВІ, який дозволяє автоматизувати процес та підвищити точність вимірювання ВП в 1,2–1,4 раза за рахунок введення БЛ, ЛА, обчислення ВП, ТП, що розміщений у потоці палива поза зоною дії НЕ, двох груп ТП, розташованих по різні боки від НЕ, причому ТП в групах розміщені на заданих відстанях від даного НЕ;
- два калориметричних витратоміри моторного палива з підвищеною точністю вимірів, які здатні зменшувати похибку, порівняно з прототипом, на 7–19% завдяки введенню БКТ, вхідних НЕ прямого та ЗПП, що забезпечує можливість регулювання температури палива на входах трубок прямого та ЗПП, а також завдяки введеній компенсації похибок: температурної, струмопідведення, сили тяжіння та в’язкого тертя. Запропоновані витратоміри здатні інтегруватись в усі сучасні системи живлення ДВЗ з ЗЗП в бак.

3. Розроблено спосіб розширення діапазону вимірювання ВП ТАВ. Він полягає у використанні послідовно встановлених секцій з певним співвідношенням діаметрів, що дає можливість змінювати швидкість

потоку палива крізь витратомір в декілька разів. Запропоновано новий алгоритм обробки сигналів ТП в багатосекційному тепловому витратомірі, що підвищує інформативність процесу ВВ БП: для отримання розподілу температур потоку палива з максимальною інформативністю (для зменшення ПВВП для аналізу температур потрібно вибирати трубку багатосекційного витратоміра, де їх розподіл наближається до того, коли сума різниць температур між свіма сусідніми ТП трубки ТАВ максимальна.

4. Запропоновано шляхи удосконалення процесу ВВ БП ДВЗ за допомогою ТВ, що полягають у:

- правильному виборі розмірів і кількості трубок багатосекційного ТВ, їх матеріалу, калькості ТП і місць їх встановлення (ззовні, перед НЕ, на НЕ, в потоці палива після НЕ);
- зменшенні впливу з’єднювальних конусів трубок багатосекційного ТВ на рух потоку палива задля уникнення місцевих завихрювань і їх впливу на сумарне температурне поле;
- правильному виборі типів, конструкцій і розмірів НЕ ТВ, які мають бути узгоджені з розмірами трубок та матеріалами, з яких вони виготовлені;
- врахуванні значень температур нагріву палив залежно від їх типу і концентрації БС в них.

РОЗДІЛ 6
ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВ У КОНТЕКСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Забезпечення сталого розвитку країни неможливе без підвищення ефективності експлуатації всіх видів транспорту. Особливу роль тут відіграє АТ, який має багато переваг перед іншими видами транспорту. Важливими з них є мобільність, гнучкість, можливість здійснення перевезень пасажирів і вантажів «від дверей до дверей».

6.1 Прогнозування виробництва і використання біопалива в Україні у процесі та після військових дій

Значна частина країн активно інвестує у виробництво БП як енергетичну альтернативу нафтопродуктам та спосіб зменшення викидів парникових газів. Україна має великий потенціал у сфері вирощування біопаливних культур і виробництва БП. Цьому сприяє наявність значних площ земельних ресурсів сільськогосподарського призначення, сприятливі кліматичні умови, розташування транспортних коридорів, наявність необхідних факторів виробництва.

В останні десятиліття спостерігається значний вплив діяльності людини на НС. У загальному забрудненні повітря атмосфери частка традиційного АТ, що використовують ДВЗ складає 20–30%. Не зважаючи на глобальну безпекову нестабільність, в Україні та світі в цілому, залишається актуальним впровадження положень концепції сталого розвитку. Значну увагу потрібно приділити впровадженню інновацій у пошуку та використанні АДЕ, зокрема БП.

БП виробляється з біологічної енергетичної сировини. Воно може використовуватися самостійно, а також як складова або

сировина для виготовлення сумішевих палив змішуванням з традиційними видами палива нафтового походження з урахуванням встановлених нормативів.

Виробництво БП у світі щороку збільшується (рис. 6.1) і стає все більш важливим базисом для боротьби зі зміною клімату та забезпечення сталої енергетики.

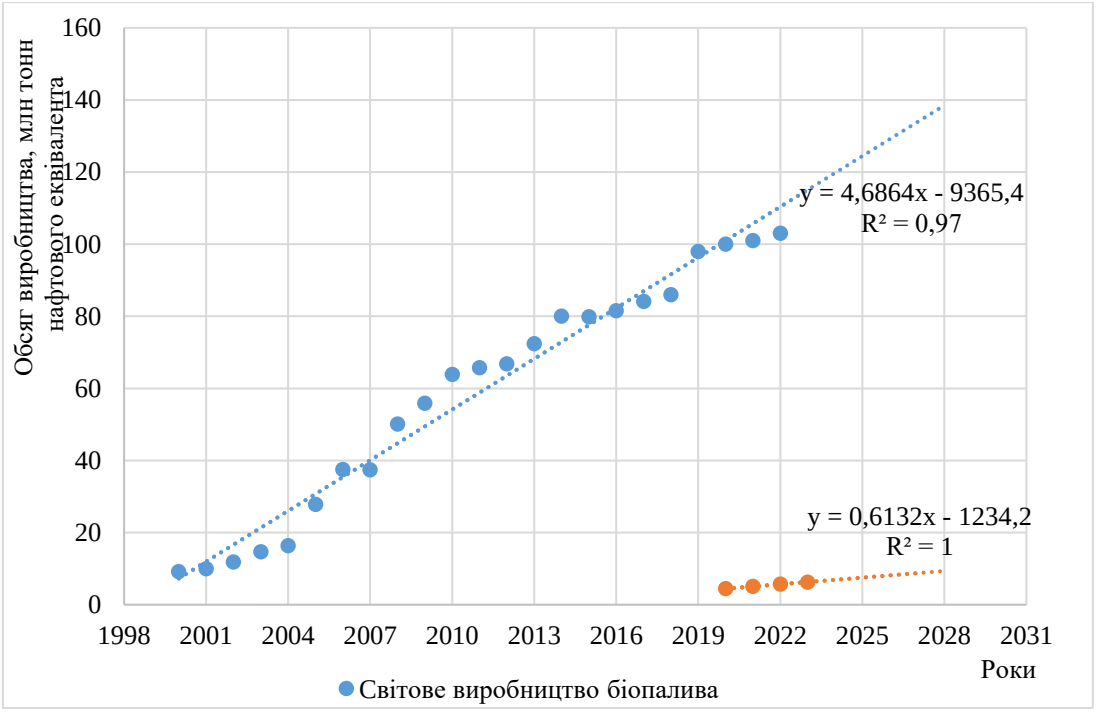


Рисунок 6.1 – Динаміка виробництва БП в світі та Україні [86, 96]

За період 2000–2022 рр. у світі спостерігалося постійне зростання виробництва БП. У 2022 р. його виробництво досягло 102 млн т нафтового еквівалента, що в 11,2 раза більше, ніж у 2000 році. На основі побудованого рівняння лінійного тренду з достовірністю 97,4% спрогнозовано подальше його зростання.

Значна частина країн активно інвестує у виробництво БП як енергетичну альтернативу нафтопродуктам та спосіб зменшення викидів парникових газів. Так, багато країн Європейського Союзу

поставили амбітні цілі щодо збільшення використання відновлюваних ДЕ, зокрема БП, в енергетичному балансі.

Україна має великий потенціал у сфері вирощування біопаливних культур і виробництва БП. Протягом 2020–2023 р.р. спостерігалося постійне зростання цього обсягу. Так, у 2023 р. він склав 6270 тис. т нафтового еквівалента, що на 1832 тис. т нафтового еквівалента або на 41,3% більше, ніж у 2020 р. Водночас спостерігається лінійна залежність, на основі побудованого рівняння якої спрогнозовано зростання виробництва БП в Україні, що з достовірністю 99,9% відображено лінією тренду.

Навіть у період повномасштабного вторгнення росії в Україну товаровиробники змогли не тільки зберегти, а й наростити обсяги виробництва БП. Отже, Україна може стати ключовим гравцем у цій сфері в усьому світі. Цьому сприяє наявність значних площ земельних ресурсів сільськогосподарського призначення, гарні кліматичні умови, розташування транспортних коридорів, наявність необхідних факторів виробництва.

Розвиток ринку БП – один із пріоритетів держави задля енергобезпеки та енергонезалежності як країни, так і громад, особливо у час воєнних енергетичних викликів і післявоєнної відбудови. Лише за рахунок агровідходів в Україні можна замістити близько 9 млрд $м^3$ природного газу на рік [174]. Аргументами на користь БП (як альтернативи викопному паливу) є: заміщення газу та заощадження від 30% до 60% коштів бюджету, забезпечення енергопостачання соціальних та важливих об’єктів критичної інфраструктури під час війни та у період післявоєнного відновлення країни, активізація економічних процесів у країні [75].

Крім того, виробництво та використання БП (як відновлюваного ресурсу) має не тільки економічну, а й соціальну та екологічну складові та сприяє сталому розвитку світової економіки в цілому й

економік окремих країн світу [75]. Через ставки акцизного податку, який впливає на ціну палива, може проявлятися і політична складова виробництва та використання БП. Висока величина акцизного збору може впливати на обсяги споживання палива, зокрема зменшуючи його через підвищення ціни. Це може сприяти зменшенню забруднення НС та стимулювати використання більш екологічних АДЕ.

Економічне обґрунтування використання інноваційних технологій на транспорті висвітлено в працях таких вчених, як Л. Мельник, О. Маценко, Т. Сахненко, М. Цинка [103]. Оцінювання ефективності діяльності різних підприємств (у разі використання АДЕ) досліджували І. Перевоза, Т. Максименко, С. Бондаренко [104], Т. Максименко [109]. Перспективи виробництва передових біопалив в Україні досліджували Г. Г. Гелетуха, Т. А. Желєзна, С. В. Драгнєв, П. П. Кучерук [110]. Екологічні та економічні аспекти управління АП описано в праці В. Гавриша, В. Ніценко, І. Перевозова, Т. Кулик, О. Василика [142]. Оцінювання соціальної складової ефективності переходу на АДЕ в сферах «економіки майбутнього» здійснено у праці І. В. Подберезні [128]. Концепцію консолідації маркетингових зусиль на світовому автомобільному ринку дослідили О. Савич і Т. Шкода [129]. Аналіз вказаних праць показав, що на сьогодні питання фінансового прогнозування виробництва та використання БП в Україні під час і після воєнних дій залишаються невирішеними.

На сьогодні виникає потреба оцінити на основі фінансового прогнозування перспективи виробництва та застосування БП з використанням РО для України у період ведення військових дій і післявоєнного відновлення економіки країни.

Лідерами з виробництва та використання БП є США, Бразилія та країни ЄС [135]. США є найбільшим виробником БЕ, який

отримують з кукурудзи та цукрової тростини. Бразилія лідирує з виробництва БД з соєвої олії. Країни ЄС активно розвивають виробництво БП з різних видів біомаси, охоплюючи деревину, солому та водорості [136].

Важливими факторами, що стимулюють розвиток біопаливного ринку, є:

- зростання екологічної свідомості людства та бажання зменшення викидів парникових газів, оскільки БП вважається більш екологічно чистим видом палива, тому що отримується з відновлюваних ДЕ;
- підтримка з боку урядів – багато країн впроваджує стимулювальну політику для підвищення доступності та конкурентоспроможності БП;
- інновації та технологічні досягнення – розробляються нові технології, які дозволяють більш ефективно та економно виробляти БП з різних видів сировини.

Однак розвиток біопаливного ринку стикається з певними викликами:

- продовольча безпека – існує загроза того, що збільшення виробництва БП може призвести до скорочення площ для вирощування продовольчих культур, а це може негативно вплинути на загальну ситуацію з продовольством в світі;
- зміна використання землі – використання землі для вирощування біомаси може призвести до втрати лісів, деградації ґрунтів тощо;
- сталий розвиток – важливо, щоб виробництво БП не завдало шкоди довкіллю та відповідало принципам сталого розвитку, основними з яких є: захист довкілля, соціальна справедливість, відсутність расової та національної дискримінації, підвищення рівня життя населення [144].

Переваги та недоліки БП у порівнянні з іншими видами палива наведено у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Переваги та недоліки БП порівняно з іншими видами палив

Ч.ч.	Переваги		Недоліки	
	Назва	Характеристика	Назва	Характеристика
1	Екологічність	Менша кількість шкідливих викидів, що сприяє меншому забрудненню повітря та допомогає боротися зі зміною клімату	Забруднення	Призводить до забруднення повітря, хоча й менше, ніж викопне паливо
2	Відновлювальність	Біомаса, яка є відновлюваним ресурсом, не виснажується на відміну від викопного палива	Конкуренція з продовольством	Деякі види БП виготовляються з їстівних культур, що може призвести до зростання цін на продовольство
			Зміна землекористування	Вирощування сировини для БП може призвести до вирубки лісів та інших змін землекористування, які можуть мати негативний вплив на довкілля

Продовження табл. 6.1

3	Енергетична незалежність	Зменшення залежності від імпорту викопного палива та стимулювання розвитку власної енергетичної галузі	Неефективність	БП може бути менш енергоефективним, ніж викопне паливо
			Висока ваотість	Виробництво БП може бути дорогим, що робить його не завжди доступним

Ступінь прояву вказаних переваг і недоліків буде залежати від виду використаного БП. Одним з найбільш популярних видів рослинних олій, що використовуються для отримання БП, є РО. В ЄС прийнятий стандарт БД EN14214, де вказані хімічні та фізичні параметри палива, це особливо суттєво для виробництва зимових марок БП, яким максимально відповідає РО. До того ж близько 5% БД, який вироблявся в Європі, отримано з українського ріпаку [175]. Тому подальші дослідження ступеня прояву переваг і недоліків використання БП в Україні проведемо на прикладі ДП з домішками РО та/або її похідних.

Перевагою РО, як і інших ОРП, є відновлюваність. В Україні наявні сприятливі умови для вирощування ріпаку. Це підтверджується постійним зростанням посівної площі (рис. 6.2), а також валового збору та врожайності (рис. 6.3).

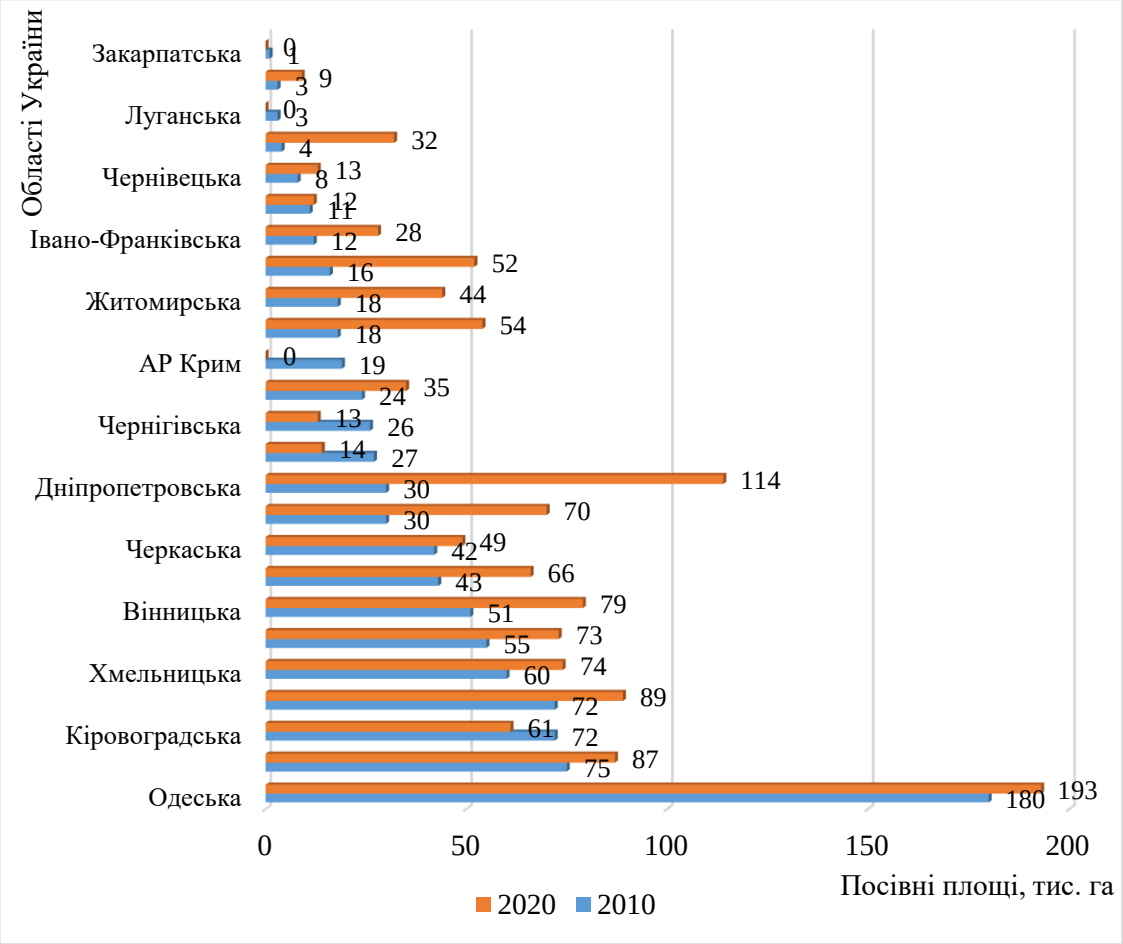


Рисунок 6.2 – Посівні площі ріпаку у 2010 та 2020 рр. [175]

Посівні площі ріпаку в 2020 р. склали 1283 тис. га, що на 42,7% більше, ніж у 2010 р. Найбільша площа посівів спостерігається протягом всього аналізованого періоду в степовій зоні України, що зумовлено якісними характеристиками ґрунтів і погодними умовами, які забезпечують найвищу урожайність цієї культури.

Урожайність ріпаку в Україні протягом 2011–2023 рр. мала стійку тенденцію до зростання і у 2023 р. досягла 2,85 т/га. Стосовно валового збору, то він напряму залежить від зміни посівної площі. Так,

у 2012 р. та 2016 р. спостерігалося значне скорочення посівних площ ріпаку, що зумовило спад його валового збору до 1300 тис. т та 1200 тис. т, відповідно.

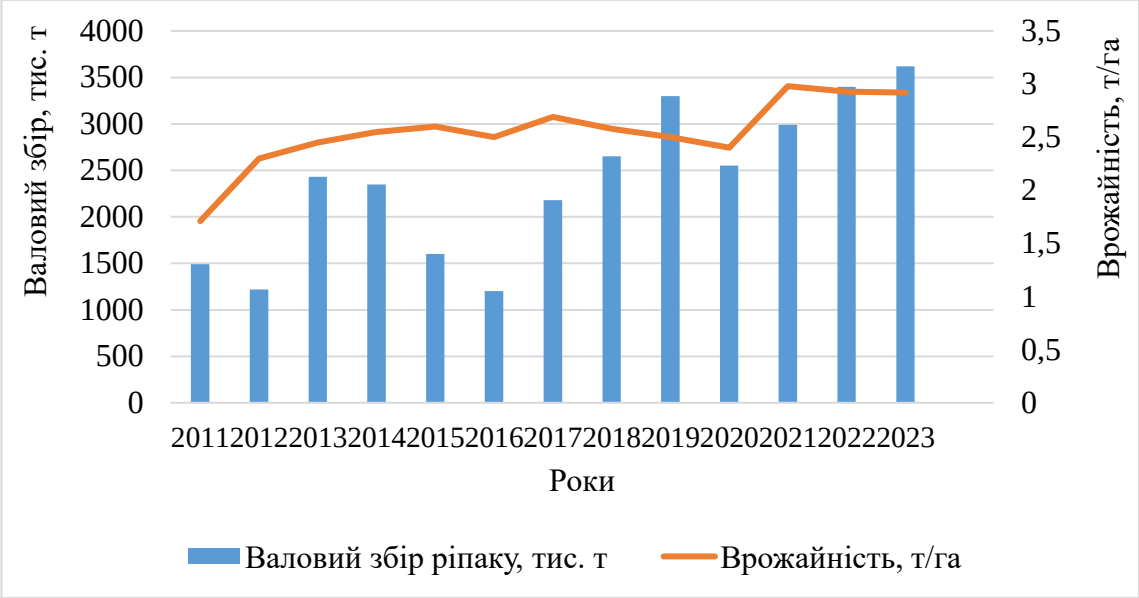


Рисунок 6.3 – Загальний врожай і врожайність ріпаку в Україні за 2011–2023 рр. [175]

За оцінками експертів станом на початок 2024 р. площа незадіяних сільськогосподарських земель в Україні становила до 4 млн га, а понад 5 млн га були непридатними внаслідок забруднень, мінування та діями, які пов’язані з наслідками проведення бойових дій [174]. Ці площі потенційно можуть бути використання для вирощування біопаливних культур.

Сільськогосподарські товаровиробники зацікавлені у вирощуванні ріпаку у зв’язку з високим попитом на його насіння та олію, а також високими цінами на них. В Україні у 2023–2024 рр. популярність ріпаку значно зросла через постійний попит європейських імпортерів на українську олію. Це зробило ріпак однією з найбільш вигідних культур для сільськогосподарських виробників. Ціни на ріпак на внутрішньому ринку привабливі для аграріїв і

залишаються конкурентоспроможними порівняно з іншими олійними культурами (табл. 6.2).

Середня ціна закупівлі насіння ріпаку на внутрішньому ринку протягом 2014–2021 рр. стабільно зростала і у 2021 р. досягла позначки 16266,3 грн/т, що ще більше стимулювало сільськогосподарських товаровиробників на збільшення обсягів виробництва.

Таблиця 6.2 – Середня ціна закупівлі насіння ріпаку на внутрішньому ринку та обсяги його переробки на олію протягом 2014–2022 рр.

Рік	Середня ціна купівлі з початку року		Перероблено з початку року		
	грн за 1 т	% до відповід-ного періоду попередн-ього року	Кількість, т	% до відповід-ного періоду попередн-ього року	% до обсягу вироб-ництва
2022	К	К	К	К	К
2021	16266,3	151,1	388026	152,2	13,0
2020	10768,8	113,0	254953	80,2	10,0
2019	9368,9	93,0	305434	136,2	9,0
2018	10071,4	101,2	224230	287,5	8,5
2017	9948,0	112,9	77989	61,4	3,5
2016	8809,0	124,6	127057	56,8	10,6

Продовження табл. 6.2

2015	7069,3	179,7	223549	127,5	13,4
2014	3934,1	129,7	168681	149,2	7,7

Умовні позначення: К – конфіденційна інформація [153]

Щодо переробки насіння ріпаку на олію, то стабільної тенденції не виявлено. За аналізований період спостерігалося значне коливання кількості переробленого насіння ріпаку, що залежало від його валового збору. На переробку всередині країні за період 2014–2021 рр. в середньому припадало 9,5% від валового збору насіння, що можна вважати незначним показником. Потенційним резервом нарощування надходжень від експортних операцій України є продаж олії ріпаку, оскільки вона є дорожчою від його насіння, яке на сьогодні експортується у непереробленому вигляді.

Однак ціни на ріпак можуть змінюватися залежно від світового виробництва та динаміки цін на європейському ринку (рис. 6.4).

Протягом 2022–2023 маркетингового року спостерігався поступовий спад ціни на ріпак з 660 €/т до 435 €/т. Проте протягом 2023–2024 маркетингового року ціна була відносно стабільною і утримувалася в середньому на рівні 448 €/т.

Експерти передбачають, що у перспективі на експорт українського ріпаку може сприятливо вплинути скорочення виробництва олії в країнах ЄС, що вже призвело до збільшення попиту на ринку.

Найкращім варіантом для нарощування валютної виручки країни можна вважати імпортування готового БП. В Україні є 14 заводів для виробництва БД з загальною потужністю 300 тис. т на рік, але значна частина з них не працює на повну потужність. Крім того, є

близько 50 малих підприємств, які можуть виробляти до 25 тис. т БД на рік, але інформація про їхню діяльність не є достовірною. Також є випадки індивідуального виробництва БД для власного використання, де як сировина використовується некондиційна олія або жири [158]. Наразі ринок рідких БП в Україні зазнає стагнації через відсутність послідовної державної стратегії та ефективних механізмів стимулювання.

Рисунок 6.4 – Динаміка світових біржових цін на ріпак [160]

Другою перевагою БП є формування енергетичної незалежності держави. Зменшення залежності від імпорту викопного палива можна здійснити негайно, адже при концентрації рослинних олій у ДП до 40% двигуни автомобілів не потребують жодних технічних змін.

6.2 Прогнозування екології сталого розвитку

На основі емпіричних досліджень [8] встановлено, що при 20% концентрації РО у ДП його витрати в двигуні автомобіля зростають лише на 1,2%. У випадку кожного наступного зростання концентрації

РО у ДП на 20% витрати будуть зростати також на 1,2% (табл. 6.3). Це пов’язано з меншою енергоефективністю вказаного палива порівняно з викопним, що можна вважати недоліком використання БП.

Таблиця 6.3 – ВП та димність ВГ дизеля в залежності від концентрації ОРП в паливі [9]

БП	Зміна ВП, %		Зміна димності ВГ дизеля з ОРП порівняно з ДП без додавання ОРП, %			
			ОК ОРП в ДП 20%		ОК ОРП в ДП 40%	
	ОК ОРП в ДП 20%	ОК ОРП в ДП 40%	Холостий хід	Вільне прискорення	Холостий хід	Вільне прискорення
ДП з РО	1,2	2,4	70,8	60,0	83,3	62,5
ДП з соєвою олією (екструдер, ρ20 ˚С = = 916 кг/м^3)	4,0	8,0	83,3	75,0	83,3	102,5

В табл. 6.3 дані щодо зміни димності ВГ дизеля з додаванням ОРП в паливо отримано експериментальним шляхом. Вимірювання проводились на автомобілі МАЗ-5335 (рис. 6.5) з двигуном ЯМЗ-236 Державного підприємства Міністерства оборони України «Укрвійськбуд-75 УНР», державний номер 52-45 С1, що мав на момент випробувань пробіг 75000 км після капітального ремонту. Кліматичні умови на момент проведення досліджень: атмосферний тиск 740 мм рт. ст., температура повітря – 1,3 °С.

Щодо екологічності БП, то у разі 20% ОК РО у ДП димність ВГ дизеля знижується на 29,2% на холостому ході та на 40,0% у випадку вільного прискорення. Зазначені показники дещо зростають при 40% ОК РО, а саме до 16,7% та 37,5%, відповідно. Але все ж негативний вплив на НС не зведений до нуля, що також є недоліком використання БП.

Рисунок 6.5 – Дослідження димності ВГ ДВЗ автомобіля МАЗ-5335 за роботи на паливах з домішками ОРП

Авторська розробка.

Якщо в ДП додати 20% соєвої олії, то ВП зросте на 4% і пропорційно зростатиме у разі збільшення ОК вказаної олії. Димність ВГ дизеля, що працює на паливі з домішками соєвої олії, вища за роботи дизеля на паливі з РО, але все ж таки менша димності ВГ за роботи на ДП без домішок в усіх варіантах, окрім вільного прискорення у випадку ОК олії 40%. В такому варіанті димність ВГ дизеля збільшується на 2,5%.

Важливим моментом є те, що, з огляду на відносно незначне збільшення витрати БП в дизелях і суттєве зменшення димності ВГ,

сумарна (валова) токсичність в г/км пробігу автомобіля з дизельним двигуном може бути знижена підбором ОК БС в ДП.

Отже, оптимальним, з огляду ВП та впливу на НС, є ДП з додаванням РО, що для України є перспективним напрямом розвитку всього ринку БП.

Одним з ключових недоліків використання ОРП як БП є їх відносно висока вартість. Але, з огляду на поточну ситуацію в Україні з паливом нафтового походження, у 2023 р. склався паритет у цінах на РО та ДП. Так, середня вартість РО у 2023 р. склала 50 грн/л, середня ж вартість ДП в Україні у цьому ж році становила 50,01 грн/л [144]. Отже, наразі цей недолік нівельовано, хоча ситуація може кардинально змінитися у післявоєнний період.

Перспективним напрямом стабілізації попиту на ОРП як на біопаливо, не зважаючи на можливе зростання цін на них, є законодавче регулювання обов’язкової частки БП в загальному обсязі рідкого моторного палива. Спроба закріпити норму споживання енергії з відновлюваних джерел, зокрема і за рахунок БП, на рівні не менше 27% від загального кінцевого енергоспоживання здійснена у проєкті Національного плану дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року [171].

Також недоліками при вирощуванні насіння ріпаку як сировини для виробництва РО є конкуренція з продовольством і зміна землекористування. Такі недоліки усуваються за рахунок раціоналізації землекористування, організації сівозмін та дотримання агрономічних вимог вирощуванні ріпаку. Для Україні ріпак не є новою сільськогосподарською культурою. Організація повного циклу вирощування ріпаку без шкоди для ґрунту та іншого рослинництва на сьогодні в країні практично налагоджена [172].

Висновки до розділу 6

1. Впровадження БП на ринку України є перспективним шляхом зменшення залежності країни від викопного палива, що є дуже актуальним як у період воєнного стану, так і у часи післявоєнного відновлення України.
2. Оцінюванням переваг та недоліків застосування БП, а саме: ДП з додаванням олії ріпаку, встановлено значне домінування переваг над недоліками, що дозволяє рекомендувати такий вид БП як одну з альтернатив викопному паливу.
3. Подальшого дослідження потребує економічне обґрунтування переведення АТЗ на використання різних видів БП.

ВИСНОВКИ

В дисертаційної роботі наведено узагальнення й вирішення актуальної наукової проблеми створення наукових основ та розробка нового методу розрахунку параметрів управління паливною економічностю автомобілів, який дозволяє враховувати зміну фізико-хімічних властивостей біопалив залежно від концентрації біологічної складової (біодомішки).

Основні наукові і прикладні результати досліджень:

1. На підставі проведеного аналізу вітчизняної та іноземної літератури, комплексного оцінювання і системного аналізу науково-практичного досвіду та існуючих підходів до підвищення паливної економічності автомобілів обгрунтувано принципи, розроблено концепцію умов ефективного використання 1 кг біопалива з урахуванням запропонованих показників: відносної густини біодомішки, відносної нижчої теплоти згорання біодомішки та відносної теоретично необхідної кількості повітря для згорання 1 кг біодомішки, що дає можливість порівнювати різні види рідких біопалив з погляду витрат, встановлювати норми витрат біопалив та контролювати їх у процесі експлуатації автомобілів.

2. Розроблено науково-методичні основи нового методу контролю витрат біопалив оцінюванням зміни густини, нижчої теплоти згорання та теоретично необхідної кількості повітря для згорання 1 кг біодомішки залежно від витрати палива автомобіля, що працює на бензині (або дизельному паливі) та витрати палива автомобіля, що працює на біопаливі з відомою об’ємною концентрацією біологічної складової. Отримані наукові результати дозволяють нормувати витрати біопалив з ураховуванням різноманіття умов експлуатації засобів автомобільного транспорту без використаня великої кількість коригувальних коефіцієнтів.

3. Встановлено вплив біодомішок до основного палива відомих об’ємних концентрацій та з відомими фізико-хімічними властивостями на витрату біопалива, на підставі чого розроблено рекомендації щодо зменшення витрат біопалив. Встановлено, що, з погляду зміни витрати біопалив, більш привабливим для автотранспортних засобів з дизельними двигунами є дизельне паливо з домішками ріпакової олії. Для сумішевого бензину з вмістом біоетанолу в 6% за об’ємом можна очикувати збільшення витрати на 2,4%, а якщо використовувати як паливо лише біоетанол – на 63%.

4. Обгрунтовано критерій і розроблено метод раціонального визначення радіального теплового потоку в трубці термоанемометричного витратоміра з циліндричною стінкою (лінійна густина теплового потоку), в які введено нові категорії: конструктивний коефіцієнт та коефіцієнт радіальної теплопровідності трубки термоанемомертричного витратоміра, який враховує фізико-хімічні властивості біопалив. Використовуючи отриманий метод можна досягти підвищення точності вимірювань і чутливості термоанемометричного витратоміра для різних витрат біопалив за умови використання таких геометричних параметрів: відношення внутрішнього діаметра трубки до діаметра нагрівального елемента $d_2/d_1 = 3/2$.

5. Запропонований новий підхід визначення теплового потоку в трубці термоанемометричного виратоміра дозволив вибрати раціональні конструктивні елементи: діаметр нагрівального елемента, матеріал трубки, діаметр нагрівального елемента за умови зменшення радіальної теплопровідності термоанемометричного витратоміра. Експериментальні дослідження показали, що розподіл температур теплового потоку палива в термоанемоментричному витратомірі з послідовно встановленими трубками довжиною 5 см, діаметрами 10, 30, 50 см на вході не перевищив 30 °С і позитивно впливає на

підвищення точності вимірювань та чутливості термоанемометричного витратоміра для різних витрат біопалив.

6. Шляхом моделювання обгрунтована послідовність розташування елементів термоанемометричного витратоміра, яка змешшує параметричне розсіювання температур потоку біопалива та дозволяє отримати підвищення точності й швидкодії вимірювання та контролю витрат біопалив, розширити діапазон вимірювання витрат, номенклатуру біопалив і функціональні можливості термоанемометричного витратоміра щодо автоматизації процесу вимірювання та контролю.

7. Обгрунтовано критерії, розроблено метод розрахунку параметрів приладу контролю витрат біопалив. Виготовлено та налаштовано макетний зразок термоанемеметричного витратоміра, проведено експериментальні дослідження витрат палив в реальних умовах руху автомобіля, які підтвердили рекомендації щодо вибору конструктивних параметрів витратоміра для підвищення точності. Розбіжність теоретичних та експериметальних даних витрат біопалив не перевищили 2,5% для дизельного палива з домішками ріпакової олії та 11,4% для бензину з біоетенолом.

8. Розроблені рекомендації щодо практичного використання запропонованої концепції контролю витрат багатокомпонентних рідких біопалив з різними біологічними домішками різних об’ємних концентрацій. Впровадження результатів науково-дослідної роботи контролю витрат рідких біопалив дозволило розробити діапазон паливної ефективності автомобілів для різних фізико-хімічних властивостей різних видів біоплив. В цьому діапазоні дослідження показали, що мінімальне значення коефіцієнта ефективності дорівнює 6% (для ріпакової олії), а максимальне – 63% (для біоетанолу).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ільченко А. В., Колодницька Р.В., Кур’ята В.П. Вплив добавок розлинних олій на вміст сажі у відпрацьованих газах двигуна автомобіля. *Вісник СНУ ім. Даля.* Луганск, 2005. № 6(88). С. 225–229.

2. Ільченко А. В., Кур’ята В.П. Математична модель відкладання сажі у випускному тракті двигуна автомобіля. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2006. № 3(38). С. 20–24.

3. Ільченко А.В., Кур’ята В.П. Вплив домішок рослинних олій до дизельного палива на димність відпрацьованих газів двигуна. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2007. № 1(40). С. 29–34.

4. Ільченко А. В. Теоретичні основи нормування витрат моторних палив з високооктановими кисневмісними добавками. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2004. № 1(28). С. 32–38.

5. Грабар І. Г., Ільченко А. В., Колодницька Р. В. Зміна витрати моторних палив з добавками ріпакової олії. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2004. № II(29). С. 19-23.

6. Ільченко А.В., Безвесільна О.М., Тростенюк Ю.В. Передача тепла в термоанемометричному витратомірі біопалив. *Вісник Східноєвропейський журнал передових технологій*. Харків, 2014. С. 47–51. doi:10.15587/1729-4061.2014.28638

7. Ільченко А. В. Теоретичні передумови зменшення витрат двокомпонентних моторних палив. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2004. № 4(31). С. 1–8.

8. Ільченко А. В., Кур’ята В. П. Математична модель витрати палива автомобіля з урахуванням збіднення паливо-повітряної суміші (на прикладі моторних палив з домішками олій рослинного походження). *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2005. № 1(32). С. 15–19.

9. Ільченко А. В. Колодницька Р. В., Кур’ята В. П. Експериментальні дослідження зміни витрат моторних палив з добавками ріпакової олії.

Автомобільний транспорт. Збірник наукових праць. Харків, 2005. № 16. С. 267–269.

10. Ільченко А. В., Романова А. О. Урахування властивостей двокомпонентних палив у процесі вимірювання їх витрати термоанемометричним витратоміром. *Вісті автомобільно-дорожнього інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет».* Донецьк, 2007. № 1(4). С. 106–109.

11. Грабар І. Г., Ільченко А. В., Кришевський М. Б., Кур'ята В. П. Експериментальні дослідження провідності палива БІО-100 з метою створення системи контролю його якості. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наукових праць*. Житомир, 2007. Випуск 5. ч. 1. С. 151–157.

12. Ільченко А. В. Обгрунтування вибору моторних біопалив за умови зменшення їх витрат двигуном автомобіля. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2008. № 2(45). С. 32–36.

13. Ільченко А. В. Перспективи застосування біодизельного палива в автомобільних двигунах. *Вісник НТУ*. Київ, 2013. № 27. С. 370–373.

14. Безвесільна О. М., Ільченко А. В., Ткачук А. Г., Пархоменко С. О. Методи вимірювання витрат рідини та конструкції витратомірів. *Вісник Інженерної академії України*. 2013. № 3–4. С. 216–222.

15. Ільченко А. В., Безвесільна О. М., Тростенюк Ю. В. Зміна радіального теплового потоку термоанемометричного витратоміра біопалив двигуна внутрішнього згоряння. *Вісник НТУ*. Київ, 2013. № 28. С. 186–191.

16. Тростенюк Ю. В., Безвесільна О. М., Ільченко А. В. Моделювання осьового теплового потоку трубки термоанемометричного витратоміра біопалив. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки».* Луцьк, 2014. № 46. С. 538–545.

17. Ільченко А.В., Тростенюк Ю.В., Тростенюк Ю.І. Моделювання осьового теплового потоку термоанемометричного витратоміра в

залежності від вмісту олій рослинного походження в дизельному паливі. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал*. Луцьк, 2014. № 2. С. 61–67.

18. Ільченко А. В. Вплив деяких параметрів конструкції теплового витратоміра палива на передачу тепла в ньому. *Вісник машинобудування та транспорту ВНТУ*. Вінниця, 2021. Том 13. № 1. С. 54–59.

19. Ільченко А. В., Багінський О. О. Шляхи зменшення похибки вимірювання витрат палив тепловим витратоміром. *Технічна інженерія. Державний університет «Житомирська політехніка»*. Житомир, 2023. № 1 (91). С. 207–213.

20. Ільченко А. В. Методологічні основи визначення і контролю витрат біопалив в процесі руху автомобіля. *Вісник машинобудування та транспорту ВНТУ*. Вінниця, 2024. № 1 (19). С. 61–67. DOI: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-61-67

21. Замула І. В., Ільченко А. В., Травін В. В. Економічні перспективи використання біопалива в контексті реалізації концепції сталого розвитку. *Ефективна економіка*. 2024. № 11. DOI: http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.11.8

22. Ilchenko, A., Bezvesilna, E. Development of calorimetric motor fuel flowmeter with increased metering accuracy by adjusting the inlet temperature. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014, 6(7). p. 50–54. (Scopus, Q3)

23. Korobiichuk, I., Bezvesilna O., Ilchenko A., … Nowicki M., Szewczyk R. Calorimetric flow meter of motor fuel with inlet temperature regulation. *4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies*. 2017. p. 975–979. (Scopus, Q3)

24. Bezvesilna O., Kamiński M., Ilchenko A. Heat transfer in the thermo-anemometric flowmeter for biofuels. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. p. 505-511. (Scopus, Q4)

25. Korobiichuk I., Bezvesilna O., Ilchenko A., Trostenyuk Y. Thermoanemometric flowmeter of biofuels for motor transport. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. p. 443-448. (Scopus, Q4)

26. Korobiichuk I., Bezvesilna O., Ilchenko A., ...Nowicki M., Szewczyk R. A mathematical model of the thermo-anemometric flowmeter. *Sensors*. Switzerland, 2015. 15(9). p. 22899–22913. (Scopus, Q1)

27. Korobiichuk I., Ilchenko A. Optimal Design Parameters of Thermal Flowmeter for Fuel Flow Measurement. *Sensors*. 2022. 8882. doi.org/10.3390/s22228882. (Scopus, Q1)

28. Ilchenko A., Korobiichuk I. Methods of Reduction of Fuel Consumption Measurement Error by Thermo-Anemometric Flow Meter. *Automation 2024*: Advances in Automation, Robotics and Measurement Techniques. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1219. *Springer, Cham.* https://doi.org/10.1007/978-3-031-78266-4_27 (Scopus)

29. Ільченко А. В. Багінський О. О. Вибір конструкції та принципу дії витратомірів для їх використання на транспортних засобах. *Modern engineering and innovative technologies*. Німеччина, 2021. Випуск № 17. С. 54–62, DOI: 10.30890/2567-5273.2021-17-02-065

30. Ільченко А. В. Аналіз зміни чутливості термоанемометричного витратоміра біопалив. *SWorldJournal*. Болгарія, 2024. № 24. С. 151–160. DOI: 10.30888/2663-5712.2024-24-00-056

31. Безвесільна О.М., Подчашенський Ю.О., Ільченко А.В., Шавурський Ю.О. Високоточний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації: пат. 91160 Україна: МПК 2009 G01F1/68, G01F1/696, F02M5/00. № 200906515; заявл. 22.06.09; опубл. 26.06.10, Бюл. № 12. 4 с.

32. Безвесільна О.М., Ільченко А.В., Подчашенський Ю.О., Шавурський Ю.О. Калориметричний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації: пат. 90985 Україна:

МПК 2009 F02M5/00. № 200910565; заявл. 19.10.09; опубл. 10.06.10, Бюл. № 11. 4 с.

33. Безвесільна О.М., Ільченко А.В. Калориметричний витратомір моторного палива з підвищеною точністю вимірів: пат. 106858 Україна: МПК 2014.01 F02M5/00, G01F1/68, G01F1/696, G01F15/00. № 201314550; заявл. 12.12.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 19. 4 с.

34. Безвесільна О.М., Ільченко А.В., Тростенюк Ю.О. Калориметричний витратомір моторного палива з підвищеною точністю вимірів: пат. 106950 Україна: МПК 014.01 F02M5/00, G01F1/68. № 201313387; заявл. 18.11.13; опубл. 27.10.14., Бюл. № 20. 8 с.

35. Ільченко А. В. Особливості процесу вимірювання витрат біопалив багатосекційним термоанемометричним витратоміром. *Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури*: Автошляховик України. Збірка тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2023. С. 273–276.

36. Ільченко А. В., Кур'ята В. П. Етанол як третя компонента при використанні дизельних палив з домішками олій рослинного походження. *XXXI Науково-практична міжвузівська конференція, присвячена Дню університету*. Житомир, 2006. С. 20.

37. Kolodnitcka R., Ilchenko A. An investigation of droplet mean diameters and fuel consumption for straight vegetable oil. *Mechanics 2006* : Proceedings of the International Scientific Conferens. Rzeszow University of Technology. 2006. № 231. P. 95–102.

38. Ільченко А. В., Колодницька Р. В. Аналіз моделей викидів сажі, оксидів азоту та витрати палив у застосуванні до біопалив у дизелях. *Практична космонавтика і високі технології*: тези VI науково-практичної конференції, присвяченої 100–річчю з дня народження академіка С. П. Королева. Житомир, 2007. С. 83.

39. Ільченко А. В. Зміна чутливості термоанемометричного витратоміра біопалива. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. Вінниця, 2024. С. 124-125.

40. Безвесільна О.М., Ільченко А.В., Тростенюк Ю.В. Програмно-апаратний комплекс для вимірювання витрат моторних біопалив термоанемометричним методом. *Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки*. Житомир, 10-12 травня 2017 р. https://conf.ztu.edu.ua/tezy-do-dnya-nauky-10-12-travnya-2017-r/

41. Колодницька Р. В., Ільченко А. В. Зв'язок між коефіцієнтом та критерієм зміни витрат двокомпонентних палив для двигунів внутрішнього згоряння. *XXXIII Науково-практична міжвузівська конференція, присвяченої Дню університету*. Житомир, 2008. С. 16.

42. Grabar I.G., Kolodnytska R.V., Arystarkhova E.O., Ilchenko A.V. The problem of clean ecological diesel fuels introducing on base of rapeseed oil. *AMMA 2002*: The National Conferens with International Participation Automobile, Environment fnd Agricultural Machinery. Cluj-Napoca, 2002. P. 255-256

43. Ільченко А.В. Похибка розробленого методу визначення та контролю витрат біопалив двигуном автомобіля. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції. Вінниця, 2025. С. 141–142.

44. Ільченко А. В. Контроль витрат біопалив як інструмент підвищення ефективності експлуатації засобів автомобільного транспорту. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту:* тези XVII Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир, 2024. С. 86–87.

45. Ільченко А. В. Тростенюк Ю. В., Тростенюк Ю. І. Вплив в’язкості біопалив на точність вимірювання їх витрат термоанемометричним витратоміром. *Всеукраїнська науково-практична on-line конференція аспірантів, молодих учених та студентів, присвячена Дню науки*. Житомир, 2015. С. 37–38.

46. Ільченко А. В. Шляхи покращення функціональних можливостей термоанемометричного витратоміра біопалив. *Синергетика, фрактали і новітні технології*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир, 2024. С. 106–110.

47. Ільченко А.В. Перевірка адекватності методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем розсіювання витрат бензинів з домішками біоетанолу. *Підвищення якості продукції машинобудівних та ремонтних підприємств*: IV Всеукраїнський науково-практичний онлайн-семінар. Харків, 2025. С. 41-42.

48. Безвесільна О. М., Ільченко А. В. Особливості застосування і вимірювання витрат біопалив дизельними двигунами, що оснащено термоанемометричними витратомірами. *Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців*: наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2017. С. 186–187.

49. Безвесільна О. М., Ільченко А. В., Тростенюк Ю. В. Експериментальний зразок термоанемометричного витратоміра моторних біопалив для двигунів внутрішнього згоряння. *Проблеми розвитку транспорту і логістики*: збірник наукових праць VII-ої Міжнародної науково-практичної конференції. Одеса, 2017. С. 171–173.

50. Безвесільна О. М., Ільченко А. В., Ткачук А. Г., Багінський О. О. Спосіб розширення діапазону вимірювання витрат палив двигунів транспортних засобів термоанемометричним витратоміром. *Новітні*

технології розвитку автомобільного транспорту: наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції, 16-19 жовтня 2018 р. Харків, 2018. С. 74–77.

51. Kolodnytska R. Kravchenko A., Ilchenko A., Vasylyev O. Fuel cell vehicles in Ukrainian perspective. *International Conference on Sustainable Materials and Energy Technologies, 12-13 September*, Coventry UK, 2019. P. 30.

52. Bezvesilna H., Ilchenko A., Tytarenko V., Krushynska N. Increasing accuracy of motor fuel consumption via calorimetric flowmeter. *Dynamics of the development of world science*: Abstracts of I International Scientific and Practical Conference. Vancouver, Canada, 25-27 September, 2019. P. 239-247.

53. Багінський О. О., Ільченко А. В. Визначення параметрів руху дизельного палива в двосекційному термоанемометричному витратомірі. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: XIII Міжнародна науково-практична конференція. Житомир. 2020. URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-ontent/uploads/2020/11/4.pdfhttps://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/11/4.pdf

54. Ільченко А. В. Удосконалення конструкції теплового витратоміра рідких моторних палив. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: XI Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція. Вінниця, 2023. С. 136–138.

55. Багінський О. О., Брожко А. М., Дивак С. О., Ільченко А. В. Вибір конструкції та принципу дії витратоміра палива для використання на транспортних засобах. *Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвячена Дню науки.* Житомир, 2019. С. 192–194, URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/05/7-tarnsportni-tehnologiyi-.pdf

56. Ільченко А. В. Поліпшення точності вимірювання витрат моторних палив тепловим витратоміром. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези XVI Міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 2023. С. 149-151.

57. Ільченко А. В., Багінський О. О. Моделювання процесу руху палива в трубці теплового витратоміра. *78-а Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів НТУ*: тези доповідей. Київ, 2022. С. 33. DOI: 10.33744/2786-6459-2022-78.

58. Ільченко А. В., Поліщук Д. С. Зменшення похибки виміру витрат палив тепловим витратоміром вибором його конструктивних параметрів. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем*: тези конференції. Рівне, 2022. С. 249–251.

59. Ільченко А. В. Вплив геометричних параметрів трубки теплового витратоміра на радіальний тепловий потік. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези XV Міжнародної науково-практичної конференції державного університету «Житомирська політехніка». Житомир, 2022. С. 49–50.

60. Ільченко А. В. Буздуган К. А. Вплив діаметра нагрівального елемента теплового витратоміра на похибку виміру витрати палива автомобіля. *Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів і машин*: тези міжнародної конференції. Київ, 2022. С. 61–63. DOI: 10.33744/978-966-632-316-6-2022-1

61. Ільченко А. В. Перевірка впливу діаметра нагрівального елемента теплового витратоміра на похибку вимірювання витрати палива ДВЗ. *Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури: виклики воєнного часу*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2022. С. 276-279.

62. Бегерський Д .Б., Ільченко А. В. Моделювання процесів руху палива в багатосекційному тепловому витратомірі. *79-а Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів НТУ*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2023. С. 66–67. DOI: 10.33744/2786-6459-2023-79

63. Ільченко А. В. Тепловий витратомір моторних палив з розширеним діапазоном виміру витрат. *Міжнародна науково-практична конференція Auto-TRAK-2023*: тези доповідей. Київ, 2023. С. 111–113.

64. Безвесільна О.М., Ільченко А.В. Термоанемометричний витратомір біопалива для автомобільних двигунів. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 2017. С. 66–68.

65. Забарний Г.М., Кудря М.О., Кондратюк Г.Г., Четверик Г.О. Термодинамічна ефективність та ресурси рідкого біопалива України. *Інститут відновлювальної енергетики НАН України. Відділ відновалювальних органічних енергоносіїв*. Київ, 2006. 226 С.

66. Колодницька Р. В. Моделювання витрати дизельного біопалива для автомобільного транспорту. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 2021. С. 114–117.

67. APK Inform. URL: https://www.apk-inform.com/ru/exclusive/topic/1528162 (date of acctss: 01.06.2020).

68. Войтов В. А., Даценко М С., Карнаух М. В., Сорокін С. П. Особливості експлуатації паливної апаратури дизелів сільськогосподарського призначення при застосуванні біологічного палива. *Науковий вісник НУБіП України*. 2010. № 144. С. 29–32.

69. Войтов В. А., Даценко М. С., Карнаух М. В. Техніко-експлуатаційні та екологічні показники дизельних двигунів при

застосуванні біодизеля. *Техніка і технологія АПК*. 2009. № 1. С. 13–18.

70. Knothe G., Gerpen J., Krahl J. The biodiesel handbook. Champaign, Illinois. 2005. 286 p.

71. Основи теплопередачі. URL:https://studfile.net/preview/9174755/ (дата звернення: 01.02.2023).

72. Теплопровідність рідин. URL: https://www.google.com/search?q=%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C+%D1%80%D1%96%D0%B4%D0%B8%D0%BD&oq=%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C+%D1%80%D1%96%D0%B4%D0%B8%D0%BD&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIHCAEQABjvBTIKCAIQABiABBiiBDIKCAMQABiABBiiBDIKCAQQABiABBiiBDIKCAUQABiiBBiJBdIBCTEyMjYyajBqN6gCALACAA&sourceid=chrome&ie=UTF-8 (дата звернення: 01.02.2012).

73. Теплопровідність палив. URL: https://www.google.com/search?q=%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C+%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%B0+%D1%82%D0%B0%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D1%86%D1%8F&sca_esv=f7156635f6e9a261&sxsrf=AE3TifMReo1A8iqrDWzzycgOs4cYe0dZmA%3A1752067207068&ei=h2xuaPz7A9WOwPAPzL39IA&oq=%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C+%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2&gs_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcnAiK9GC0LXQv9C70L7Qv9GA0L7QstGW0LTQvdGW0YHRgtGMINC_0LDQu9C40LIqAggBMgUQIRigATIFECEYoAEyBRAhGKABMgUQIRigAUiIMl

C_B1jQG3ABeAGQAQCYAYEBoAHzB6oBAzUuNbgBA8gBAPgBAZgCC6ACiQrCAgoQABiwAxjWBBhHwgIEECMYJ8ICCBAAGIAEGKIEwgIIEAAYogQYiQXCAgUQABjvBcICBhAAGBYYHsICCBAAGIAEGMsBwgIKECMYgAQYJxiKBcICBRAAGIAEmAMAiAYBkAYIkgcEMS4xMKAH0k6yBwQwLjEwuAfcCcIHBTMtMy44yAf1AQ&sclient=gws-wiz-serp (дата звернення: 01.02.2010).

74. Електроний архив КНУТД. URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3803255-cogoric-v-ukraini-pocalo-zrostati-spozivanna-palnogo-ekspert.html (дата звернення: 01.02.2022).

75. Kolodnytska R. Hemp biofuel for automotive transport. Ukrainian perspective. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2016. № 2 (77). С. 102–107.

76. Економічна правда. URL: https://www.epravda.com.ua/news/2022/09/2/691056/ (дата звернення: 01.02.2022).

77. Майбутнє цукрової галузі. URL: http://www.ukrsugar.com/uk/post/biopalivo-majbutne-cukrovoi-galuzi-ukraini (дата звернення 01.05.2021).

78. Закон України «Про автомобільний транспорт». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text (дата звернення: 01.04.2025).

79. L-card. URL: http://www.lcard.ru/support/lgraph (date of acctss: 15.12.2013).

80. Щербатюк В. Б. Покращення екологічних показників двигунів підігрівом свіжого заряду при використанні бензину з добавкою біоетанолу : дис... д-ра філософії : 05.05.03 / НТУ. Київ, 2012. 250 с.

81. Ільченко А. В. Підвищення ефективності експлуатації автомобілів використанням моторних палив з високооктановими кисневмісними добавками : автореф. дис. ... к-та техн. наук : 05.22.20. Житомир, 2003. 19 с.

82. Закон України «Про дорожній рух». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3353-12#Text (дата звернення: 10.06.2023)

83. Howard – Hilidige R., Condon S., Leathy J.J., McDonell K. Emissions from compression ignition engined vehicles running on mineral and rape seed oil based fuel. *International conference on Air Pollution v2,* Air Pollution and Management 1995, p. 379–385.

84. Розроблення тимчасових лінійних норм витрат палива.
URL: https://insat.org.ua/services/ldvpe/6/ (дата звернення: 10.06.2022)

85. «Методичні рекомендації з нормування витрат палива, електричної енергії, мастильних, інших експлуатаційних матеріалів автомобілями та технікою» (редакція 1 від 17.11.2023). *ДП «ДержавтотрансНДІпроект»*. Київ, 2023. URL: https://insat.org.ua/files/services/ldvpe/6/metod.pdfhttps://insat.org.ua/ files/services/ldvpe/6/metod.pdf (дата звернення: 10.06.2022)

86. Біоенергетика в світі. URL: https://uabio.org/bioenergy-in-the-world/ (дата звернення 10.11.2023)

87. Захарчук В. І. Методологічні основи використання альтернативних моторних палив у засобах транспорту : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.22.20. Харків, 2016. 36 с.

88. Bai A., Jobbady P., Popp J., Grasselli G., Szendrei J., Balogh P. Technical and environmental effects of biodiesel use in local public transport. *Transp. Res. Part. D : Transp. Environ*. 2016. 47. P. 323–335.

89. Lesnik L., Bilus I. The effect of rapeseed oil biodiesel fuel on combustion, performance, and the emission formation process withinn a heavy-duty DI diesel engine. *Energy Convers. Manag*. 2016. 109. P. 140–152.

90. Frenzel F., Grothey C., Habersetzer M., Hiatt H. Industrial Flow Measurement Basics and Practice. *ABB Automation Products GmbH*, 2011. P. 290.

91. Gao Y., Li H., Chin X., Sens J. Fuel consumption measurement system for internal combustion engine based on elliptical gear flowmeter. *Actuation*. 2011. 24 (9). P. 1353–1358.

92. Liu S., Ding F., Ding C., Man Z. A high-pressure bi-directional cycloid rotor flowmeter. *Sensors.* 2014. 14(8). P. 15480–15495. doi: 10.3390/s140815480

93. Thermal Flowmeter Technology. URL: http//flowmeters.com/thermal-technology (date of access: 22.01.2010).

94. Heat transfer in thermoanemometric biofuels flowmeter. URL:http://www.bronkhorst.com/files/published_articles/sensor99.pdf (date of access: 12.03.2019).

95. Korobiichuk I., Shavursky Yu., Nowicki M., Szweczyk R. Research of the thermal parameters and the accuracy of flow measurement of the biological fuel. *Mech. Eng. Autom.*, 2015. 5. P. 415–419.

96. Рідкі біопалива: біоетанол та біодизель. URL: https://uabio.org/liquid-biofuels/ С (дата звернення: 10.06.2022).

97. Засоби і методи вимірювань неелектричних величин / Є С. Поліщук та ін. Львів: *Видавництво «Бескид Біт».* 2008. 368 с.

98. Шматок С. О., Подчашинський Ю. О., Шматок О. С. Математичні та програмні засоби моделювання пристроїв і систем управління. Використання нечітких множин та нейтронних мереж. Житомир : *ПВВ ЖДТУ*, 2007. 280 с.

99. Руденко О. Г., Бодянський Є. В. Штучні нейронні мережі. Харків : *ТОВ «Компанія СМІТ»* 2006. 404 с.

100. Розвиток біржової торгівлі біопаливом буде драйвером для української біоенергетики на користь енергобезпеці країни і громад. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/rozvytok-birzhovoi-torhivli-biopalyvom-bude-draiverom-dlia-ukrainskoi-bioenerhetyky-na-koryst-enerhobezpetsi-krainy-i-hromad (дата звернення: 10.06.2022).

101. Яцук В. О., Малачівський П. С. Методи підвищення точності вимірювань. Львів : *Видавництво «Бескид Біт»*, 2008. 368 с.

102. Метрологія та вимірювальна техніка / Є. С. Поліщук та ін. Львів: *Видавництво «Бескід Біт».* Львів, 2003. 544 с.

103. Мельник Л. Г., Маценко О. М., Сахненко Т.І ., Цинка М. Є. Економічне обгрунтування використання інноваційних технологій на транспорті. *Вісник Сумського державного університету. Серія Економіка.* 2022. № 1. С. 69−78. DOI: 10.21272/ 1817-9215.2022.1-7.

104. Бондаренко С., Перевозова І., Максименко Т. Реалізація інноваційних проектів з використанням відновлюваних джерел енергії в сферах «економіки майбутнього». *Соціальний розвиток і безпека.* 2020. № 10 (3). С. 145–157. URL: https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.3.13 (дата звернення: 10.06.2022).

105. Thermal Flowmeter Technology. *BCC Research*. 2013. URL: http://www.flowmeters.com/thermal-technology (date of access: 22.01.2014).

106. Boyes W. Instrumentation Reference book. *Linacre House*. Ed. 4. 2010. 530 p.

107. Duffy G., Gabriel J. Thermal mass flow measurement. *Dublin City University*, 2000. URL: http://doras.dcu.ie/18552/1/Gabriel_J_Duffy.pdf (date of access: 12.02.2005).

108. Economical thermal mass flow sensor based on constant temperature anemometry. Nurnberg, Germany, 1999. URL: http://www.bronkhorst.com/files/published_articles/sensor99.pdf (date of access: 26.04.2009).

109. Максименко Т. О. Оцінювання ефективності діяльності підприємств при переході на альтернативні джерела енергії : автореф. дис. … к.е.н. спец. 08.00.04. Івано-Франківськ. 2021. 20 с.

110. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Драгнєв С. С., Кучерук П. П. Перспективи виробництва передових біопалив в Україні.

Енерготехнології та ресурсозбереження. 2023. № 3. С. 71–82. DOI: 10.33070/etars.3.2023.06.

111. Білинський Й. Й., Стасюк М. О., Гладишевський М. В. Аналіз методів та засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та їхня класифікація. *Наукові праці ВНТУ.* Вінниця, 2015. № 1. С. 1–11.

112. Вимірювальна техніка. URL:http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_527.html (дата звернення: 20.05.2007).

113. Mess-und kontrolltechnik. URL: http://www.meskotex.com/diaphragm.htm (date of access: 13.04.2021).

114. Mess-und kontrolltechnik. Контроль температури. URL: http://www.meskotex.com/hm.htm (дата звернення: 13.04.2021).

115. Пакко. URL: http://www.packo.ua/node/1763 (дата звернення 20.10.2020).

116. 3-jet-flowmeters. URL: http://npopramen.ru/information/other-flowmeters/specific-methods/3-jet-flowmeters (date of access: 11.02.2014).

117. Захарчук В. І., Ткач ук В. В. Аналіз властивостей альтернативних палив для автотракторних дизелів. *Наукові нотатки*: міжвузівський збірник. 2010. Вип. 28. С. 227–230.

118. Аналіз методів та засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та їхня класифікація. URL: http://auto.info/post/101488904990008/ (дата звернення: 10.06.2018.)

119. Безвесільна О. М., Шавурський Ю. О. Основні вимоги до витратомірів автомобільного біодизельного палива. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2009. № 1 (48). С. 58–64.

120. Hyperflow performance prodact. URL: http://npovympel.ua/files/pdf/hyperflow-us.pdf (date of access: 17.05.2021).

121. Вимірювальна техніка. URL: http://www.eti.su/articles/izmeritelnayatehnika/izmeritelnaya-tehnika_529.html (дата звернення: 10.05.2015).

122. Chattopadhyay P. Flowmeters & Flow Measurement. *New Delhi*. 2006. 2. P. 76.

123. ДСТУ 320.001 49943.015-2000. Бензини моторні сумішеві. Технічні умови. Чинний від 16.03.2000. Вид. офіц. *Держнафтогаз України*, 2000. 24 с.

124. Гутаревич Ю. Ф., Говорун А. Г., Корпач А. О. Етиловий спирт як моторне паливо. *Автошляховик України.* 1999. № 1. С. 7–10.

125. Гутаревич Ю. Ф., Говорун А. Г., Корпач А. О. Порівняльна оцінка токсичності двигуна з іскровим запалюванням при роботі на бензині й етиловому спирті. *Автошляховик України*. 2003. № 2. С. 18–20.

126. Гутаревич Ю. Ф., Говорун А. Г., Корпач А. О. Вплив виду палива на вміст формальдегіду і ацетальдегіду у відпрацьованих газах двигуна з іскровим запалюванням. *Автошляховик України*. 2002. № 4. С. 10–13.

127. Гавриш В., Перевозова І., Кулик Т., Василик О. Управління альтернативними транспортними паливами: енергетичні, екологічні та економічні аспекти. *Studies in Systems, Decision and Controlthis link is disabled*. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85746-2_5 (дата звернення: 10.11.2013).

128. Подберезня І. В. Поняття «інноваційні технології», види інноваційних технологій в туризмі. *Наукові записки Херсонського відділу Українського географічного товариства*. URL: http://ekhsuir.kspu.edu/bitstream/handle/123456789/7787/%D0%9F%D0%BE%D0%B4%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D1%8F.pdf?sequence=1 (дата звернення: 10.11.2019).

129. Савич О., Шкода Т. Концепція консолідації маркетингових зусиль на світовому автомобільному ринку. *Бізнес і менеджмент 2020 :* вибрані доповіді 11-ї Міжнародної наукової конференції. Вільнюс (Литва), 2020. С. 63–72. URL: https://doi.org/10.3846/bm.2020.542 (дата звернення: 10.11.2022).

130. Бойко П. М. Сировинна база для біопалив України. Аналіз міжнародного досвіду використання біопалив для автотранспорту. *Управління безпекою та якістю транспортних засобів і перевезень : зб. наукових праць. Автошляховик України: окремий випуск*. 2003. С. 45–47.

131. Говорущенко М. Я., Туренко А. М. Системотехніка транспорту (на прикладі автомобільного транспорту). Вид. 2-е, перероб. та доповн. Харків: РІО ХДАДТУ, 1999. 468 с.

132. Energy. URL: https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/biofuels (дата звернення: 12.04.2024).

133. Редзюк А. М., Рубців В. О., Гутаревич Ю. Ф. Проблеми та перспективи використання рослинної олії як моторного палива. *Автошляховик України*. 1999. № 1. С. 4–6.

134. Семенов В. Г., Колодницька Р. В. Визначення фізико-хімічних показників альтернативних палив рослиннного походження для дизелів сільськогосподарських машин. *Вісник ЖДТУ*. 2003. № 3(27). С. 57–65.

135. Величезний потенціал сучасних біопалив. URL: https://uk.eureporter.co/energy/biofuels-environment-energy/2023/11/29/the-enormous-potential-of-advanced-bio-fuels/ (дата звернення: 14.04.2024).

136. Bioenergy. Energy. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: https://www.fao.org/bioenergy/en/ (дата звернення: 12.04.2024).

137. Овчинніков Д. В. Поліпшення показників сучасних бензинових двигунів раціональним використанням добавки біоетанолу до бензину : дис. ... д-ра філософії : 142. *НТУ*. Київ, 2021. 201 с.

137. Властивості палива і масла. URL: http://thermalinfo.ru/svojstva-zhidkostej/toplivo-i-masla/svojstva-topliva-i-masel (дата звернення: 10.11.2017).

139. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. URL: http://www.xiron.ru/content/view/58/28/ (дата звернення: 10.11.2017).

140. Витратоміри палива серії OGM-A. URL:http://prock.com.ua/cowell-to-oval/ (дата звернення: 10.11.18).

141. Безвесільна О. М., Шавурський Ю. О. Динамічні характеристики термоанемометричного витратоміру. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2009. № 2 (49). С. 30–23.

142. Автомобілі КрАЗ. URL: https://banga.ua/pages/avtomobili-kraz/samosvaly/kraz-6510-030-010 (дата звернення: 12.05.20).

143. Blagos group. URL: https://blagos.com.ua/ua/index.php?route=blog/article&blog_category_id=74&article_id=131 (дата звернення: 04.07.2021).

144. Ринок біопалива: наскільки відкрите вікно можливостей для України. URL: https://agroportal.ua/publishing/lichnyi-vzglyad/rinok-biopaliva-naskilki-vidkrite-vikno-mozhlivostey-dlya-ukrajini (дата звернення: 15.04.2024).

145. Дизельне паливо. URL: http://unk.ua/uk/dizelnoe-toplivo-1 (дата звернення: 12.05.2019).

146. Безвесільна О. М., Шавурський Ю. О. Похибки термоанемометричного витратоміра. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2009. № 4 (51). С. 120–124.

147. Динаміка посівних площ ріпаку 2010-2019 рр. в Україні. URL: https://kurkul.com/infographics/view/109 (дата звернення: 12.04.2024)

148. Пістун Є. П., Лисовой Л. В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. *Львів : Видавництво ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв»*, 2006. 576 с.

149. Промислові засоби автоматизації. Вимірювальні пристої / А. К. Бабіченко та ін. *Харків : ООО «Роми»,* 2001. 256 с.

150. ДСТУ ISO/TR 7066-1:2007. Оцінка невизначеності під час калібрування та застосування приладів вимірювання витрати. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50535 (дата звернення: 13.09.2017).

151. З початку сезону Україна експортувала 2.4 млн тонн ріпаку. URL: http://shareuapotential.com/ru/News/Newsline/ukraine-ripak-2023-11.html (дата звернення: 09.04.2024)

152. Манометри зміного перепаду тиску. URL: https://megapaskal.ru/manometry/191-rashodomery-peremennogo-perepada-davleniya.html (дата звернення: 10.11.2021).

153. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: https://ukrstat.gov.ua/ (дата звернення: 10.04.2024).

154. 4-partial-flowmeters. URL: http://npopramen.ru/information/other-flowmeters/43-hydrodynamic-methods/4-partial-flowmeters (дата звернення: 10.12.2013).

155. NTS- термістори. URL: https://www.sea.com.ua/ua/elektronnye-komponenty/ntc-termistory/ (дата звернення: 05.05.2023).

156. Безвесільна О. М. Наукові основи витратометрії. Проблеми, перспективи, дослідження. Житомир, 2014. 345 с.

157. Основи радіоелектроніки. URL: https://cxem.net/beginner/beginner114.php (дата звернення: 10.11.2020).

158. Світові ціни на ріпак. URL: https//index.minfin.com.ua/ua/markets/commodities/ rapeseedoil/ (дата звернення: 01.04.2024).

159. Zhou M., Jin H., Wang W. A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. Transportation Research,

Part D: Transport and Environme*nt*. 2016. Volume 49. P. 203-218. DOI: 10.1016/j.trd.2016.09.008

160. Аналітики підвищили прогноз виробництва ріпаку в Україні у 2024 році. URL: https://agro-business.com.ua/agrobusiness/item/29505-analityky-pidvyshchyly-prohnoz-vyrobnytstva-ripaku-v-ukraini-u-2024-rotsi.html (дата звернення: 07.04.2024).

161. Агротендер. URL:https://agrotender.com.ua/traders/region_ukraine/maslo _rapsovoe (дата звернення: 20.04.2024).

162. Безвесільна О. М. Наукові основи витратометрії. Проблеми, перспективи, дослідження. Житомир : РВВ ЖДТУ, 2014. 346 с.

163. Безвесільна О. М. Витратометрія та витратоміри. *Житомир : РВВ ЖДТУ*, 2011. 220 с.

164. Безвесільна О. М., Таланчук П. М. Перетворюючі пристрої приладів. Київ : ІСДО, 1994. 448 с.

165. Безвесільна О. М., Шавурський Ю. О. Динамічні характеристики термоанемометричного витратоміра. *«Вісник» ЖДТУ. Технічні науки*. Житомир, 2009. № 2(49). С. 20–23.

166. Безвесільна О.М., Шавурський Ю.О. Новий термоанемометричний витратомір для вимірювання витрат біопалива. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, Харків, 2009. № 6. С. 11–13.

167. Безвесільна О. М., Подчашинський Ю. О., Шавурський Ю. О. Лінійне нейромережеве відновлення і фільтрація вимірювальної інформації про механічні величини. *Вісник інженерної академії України*, 2011. С. 132–138.

168. Безвесільна О. М. Шавурський Ю. О. Високоточний автоматизований термоанемометричний витратомір біологічного палива. *Житомир : РВВ ЖДТУ*, 2012. 268 с.

169. Терейковський І. А., Бушуєв Д. А., Терейковська Л. О. Штучні нейронні мережі. Базові положення. Електронне мережне навчальне видання. *Київ: КПІ ім. І Сікорського*, 2022. 123 с.

170. Вартість дизельного палива на АЗС України. URL: https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/dt/ (дата звернення: 15.04.2024).

171. Проєкт Національного плану дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року. URL: https://saee.gov.ua/sites/default/files/DraftNPDVE_2030_SAEE_21_09_2022.pdf (дата звернення: 09.04.2024).

172. 5 переваг та 5 недоліків вирощування ріпаку. Особливості технології. URL: https://superagronom.com/articles/63-5-perevag-ta-5-nedolikiv-viroschuvannya-ripaku-osoblivosti-tehnologiyi (дата звернення: 09.04.2024).

173. Рудзінський В. В., Тімков О. М., Рудзінська О. В. Сертифікація та методи випробувань на автомобільному транспорті. *Київ : РВВ НТУ*, 2012. 160 с.

174. Rozvytok birzhovoi torhivli biopalyvom bude draiverom dlia ukrainskoi bioenerhetyky na koryst enerhobezpetsi krainy i hromad. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/rozvytok-birzhovoi-torhivli-biopalyvom-bude-draiverom-dlia-ukrainskoi-bioenerhetyky-na-koryst-enerhobezpetsi-krainy-i-hromad (date of access: 12.04.2024).

175. Dynamika posivnykh ploshch ripaku 2010-2019 rr. v Ukraini. URL: https://kurkul.com/infographics/view/109 (date of access: 12.04.2024).

176. Датчик температури DS18B20 цифровий. URL: https://www.google.com/search?q=dallas+18b20+%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5&oq=%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8+Dallas+DS18B20&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUqCggE

EAAYgAQYogQyBggAEEUYOTIKCAEQABiABBiiBDIKCAIQABiABBiiBDIKCAMQABiABBiiBDIKCAQQABiABBiiBNIBCTEyNjIxajBqN6gCALACAA&sourceid=chrome&ie=UTF-8 (дата звернення: 06.06.2021).

177. Захарчук В. І., Ткачук В. В. Експлуатаційні показники біодизельних палив. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2010. Вип. № 7. С. 98–102.

178. Захарчук В. І., Ткачук В. В. Перспективи застосування ізопропілового ефіру ріпакової олії в якості дизельного палива. *Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст.* 2010. Вип. № 20. С. 78–84.

179. Захарчук В. І. Оцінка доцільності переведення транспортних засобів на альтернативні палива з технічної та екологічної позицій. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2013. № 30 (1003). С. 79–84.

180. Захарчук В. І. Методика підбору альтернативних моторних палив для транспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету.* 2013. Вип. 27. С. 195–201.

181. Захарчук В. І., Захарчук Ю. В. Оцінка показників двигуна при його роботі на альтернативних паливах. *Наукові нотатки : міжвузівський збірник.* 2014. Вип. 45. С. 204–209.

182. Zaharchuk V., Tkachuk V., Zaharchuk O. Estimation of biodiesel fuel on the basis of rape oil and isopropyl alcohol. *Polish academy of scienses, branch in Lublin*, volume XI, Lublin, 2011. P. 450–456.

183. Zaharchuk V., Tkachuk V., Usenko M. Estimation operational properties of biodiesel fuel – isopropyl esters rape oil. *INMATEH – agricultural engineering.* Bucharest, Romania. Vol. 34. № 2. 2011. P. 87–90.

184. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо обов’язковості використання рідкого біопалива (біокомпонентів) у галузі транспорту». URL:

https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3769-20#Text (дата звернення: 10.05.2025).

185. Макаров В. А., Макарова Т. В., Чернега В. Ю. До оцінки ефективності функціонування системи «колесо-дорога» : е*лектронний збірник тез XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 24-26 жовтня, м. Житомир. 2022. URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/12/93.pdf2 (дата звернення: 02.03.2023).

186. Сосіда С. В. Поліпшення паливної економічності двигуна з іскровим запалюванням при використанні спиртовмісної добавки до бензину : дис. … д-ра філософії : 142. *НТУ*, Київ, 2024. 240 с.

187. Добровольський О. С., Цюман М. П., Ступак Н. С., Сосіда С. В. Вплив добавки спирту до бензину на викиди забруднюючих речовин з відпрацьованими газами двигуна з іскровим запалюванням. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»* 2021. № 3(50). С. 57–66.

188. Howard – Hilidige R., Condon S., Leathy J. J., McDonell K. Emissions from compression ignition engined vehicles running on mineral and rape seed oil based fuel. *International conference on Air Pollution*.. *Air Pollution and Management.* 1995. V. 2. P. 379–385.

Додаток А Фізико-хімічні властивості олій рослинного походження, бензину та дизельного палива

Таблиця А.1 – Фізичні властивості ОРП [70-72, 75, 134]

Олія	Густина, кг/м^3	Температура, °С	
		застигання	плавління
Абрикосова	919 (15 °С)	-20	від –16 до –20
Арахісова	910–960 (25 °С)	від -3 до -5	
Букова	921(15 °С)	-17	
Гірчична	918 (15 °С)	-15	
Какао (боби)	960 (15 °С)	від +21,5 до +27	від +33 до +35
Касторова	962 (25 °С)	від -10 до -18	
Кедрова	929 (15 °С)	-20	
Кокосова	925 (15 °С)	від +19 до +26	від +24 до +27
Конопляна	929 (15 °С)	-27	
Коріандрова	926 (15 °С)	-4	
Кукурудзяна	924 (15 °С)	від -10 до -15	
Кунжутна	922 (15 °С)	-2	
Льняна	935 (15 °С)	від -18 до -27	
Макова	933 (15 °С)	від -15 до -20	+2
Мигдальна	917 (15 °С)	від -10 до -21	
Обліпихова	926 (15 °С)	-20	
Оливкова	917 (15 °С)	від -2 до -6	
Горіхова	925 (15 °С)	-27	
Пальмова	923 (15 °С)	від +31 до +41	від +27 до +30
Пальмова	930 (15 °С)	від +19 до +24	от +25 до +30
Периллова	931 (15 °С)		
Персикова	920 (15 °С)	від -20 до -238	
Сонячна*	924 (15 °С)	від -16 до -19	
Ріпакова**	914 (15 °С)	від -4 до -10	
Рижикова	925 (20 °С)	від -15 до -18	
Сафлорова	925 (20 °С)	від -13 до -20	–5
Сливова	918 (15 °С)	від -5 до -17	
Соєва	928 (15 °С)	від -8 до -18	від -7 до -8
Сурепова	918 (20 °С)	-8	
Тунгова	940 (20 °С)	від -17 до -21	
Бавовняна	920 (20 °С)	від -1 до -6 нижче 10 – білий осад	
Чисті однокислотні триацилгліцерини			
Трилаурин	880,4		- 46,4
Тримиристин	871,8		- 57,0
Трипальмитин	865,7		- 65,5
Тристеарин	862,1		- 71,5
Триолеїн	915,0		- 4,9
Трилинолеїн			-12,9
Трилиноленин			-23,0

Примітка. * – низькоолеїнове; ** – високоерукове

Таблиця А.2 – Залежність густини ОРП від температури, кг/м^3 [70-72, 75, 134]

Олія	Температура, ºС							
	10	15	20	30	40	45	50	60
Соняшникова:								
– нерафінована	923	920	916	910	903			
– рафінована	924		926	923	918	915		
Бавовняна	928		921	914	908			
Соєва:								
– нерафінована	927	922	920	913	907			
– рафінована	926		919	912	905			
Кокосова		925		912	905	904	900	
Кукурудзяна	926	924	920	913	906			
Пальмова		921			913	910	907	
Пальмовий стеарин						915	901	885
Ріпакова		911	907					

Таблиця А.3 – Залежність кінематичної в’язкості ОРП від температури, мм^2/с [70-72, 75, 134]

Олія	Температура, °С					
	20	30	40	60	80	100
Соняшнікова						
– форпресова:						
нерафінована	60,3	38,5	27,6	15,4	9,64	6,62
рафінована	58,4	38,9	28,2	20,6	9,3	
– екстракційна						
нерафінована	59,1	39,2	27,4	20,5	9,5	
Бавовняна						
– форпресова:						
нерафінована	70,1	44,4	31,7			
рафінована	67,3	43,2	31,1			
– екстракційна:						
нерафнована	73,3	45,3	32,1			
рафінована	67,5	43,3	30,9			
Соєва						
– форпресова:						
нерафінована	59,7	38,5	27,5			
рафінована	60,8	39,6	28,3			
– екстракційна:						
нерафінована	57,4	38,3	27,5			
рафінована	59,9	39,3	28,0			
Арахісова	75,9					
Кокосова			25,1	13,0	7,75	5,14
Кукурудзяна	72,3	45,9	30,5			
Оливкова	84	52	36	17	8	
Пальмова			38,5	19,5	11,4	7,47
Ріпакова	92,8					

Таблиця А.4 – Залежність питомої теплоємності ОРП від температури, кДж/кг К [70-72, 75, 134]

Олія	Температура, °С					
	–10	0	10	20	30	50
Соняшнікова нерафінована	1,84	1,87	1,90	1,92	1,95	2,01
Соняшнікова рафінована			1,73	1,78	1,82	1,90
Бавовняна нерафінована	1,6	1,65	1,7	1,74	1,78	1,88
Бавовняна рафінована			1,7	1,73	1,77	1,86
Соєва	1,72	1,76	1,79	1,82	1,84	1,9
Кісточкова	1,54	1,57	1,6	1,65	1,66	1,72
Кукурудзяна	1,63	1,66	1,69	1,73	1,74	1,8
Оливкова			1,98			
Ріпакова			2,0	2,01	2,01	

Таблиця А.5 – Залежність температуропровідності ОРП від температури, х10^8 м^2/с [71, 72, 136]

Олія	Температура, °С			
	10	20	30	40
Соняшнікова	9,66	9,44	9,16	8,94
Бавовняна	11,38	11,19	10,97	10,77
Соєва	10,66	10,55	10,27	10,08
Кокосова	7,92	4,27	3,54	2,14
Кісточкова	12,08	11,41	10,91	10,61
Кукурудзяна	11,05	10,86	10,75	10,69

Таблиця А.6 – Залежність теплопровідності ОРП від температури, Вт/м·К [71, 72, 136]

Олія	Температура, °С				
	10	20	30	40	50
Соняшнікова нерафінована	0,168	0,166	0,162	0,160	0,159
Соняшнікова рафінована	0,169	0,167	0,165	0,163	0,162
Бавовняна нерафінована	0,188	0,186	0,184	0,182	0,178
Бавовняна рафінована	0,169	0,167	0,166	0,164	0,162
Соєва	0,179	0,176	0,174	0,172	0,169
Кісточкова	0,170	0,168	0,165	0,163	0,161
Кукурудзяна	0,176	0,173	0,171	0,170	0,168
Оливкова			0,174		

Таблиця А.7 – Теплопровідність рідкого бензину [73]

Температура, °С	-50	0	50	100	150	200
Теплопровідність, Вт/м·К	0,131	0,1204	0,1105	0,1005	0,0919	0,08

Таблиця А.8 – Теплофізичні властивості ДП [73, 138, 145]

Температура, °С	Густина, кг/м^3	Теплопровідність, Вт/м·К	В’язкість, сСт
20	878,7	0,1169	8,94
40	865,4	0,1146	4,8
60	852,0	0,1122	3,04
80	838,5	0,1099	2,14
100	825,1	0,1076	1,62

Таблиця Б.1

Моторне паливо	Додаткові дані щодо домішок [139]	ΔL_0	$\Delta\rho$	$\Delta H_н$	$\Delta\rho + \Delta L_0 + \Delta H_н$	$\Delta\rho\Delta H_н + \Delta L_0\Delta H_н + \Delta\rho\Delta L_0$	$\Delta\rho\Delta L_0\Delta H_н$	Коефіцієнт зміни витрати палива
Бензин з БЕ		0,391	0	0,357	0,748	0,14	0	1+0,63К
ДП з РО		0,107	-0,115	0,153	0,145	-0,01	-0,002	1+0,06К
ДП з RME	Ріпакометилові ефіри німецького виробництва, еруково кислота, С22:1 0,6%, $\rho_{20°C}$=877 кг/м^3	0,13	-0,06	0,12	0,19	0,015	-0,001	1+0,23К
ДП з РОРВ	РО рафінована високоерукова, С22:1 30 %, $\rho_{20°C}$=916 кг/м^3	0,13	-0,11	0,11	0,13	-0,012	-0,002	1+0,16К
ДП з СОР	Соєва олія, екструдер, $\rho_{20°C}$=916 кг/м^3	0,14	-0,11	0,13	0,16	-0,02	-0,002	1+0,2К
ДП з РОР	РО рафінована, С22:1 10 %, $\rho_{20°C}$=915 кг/м^3	0,13	-0,11	0,12	0,14	-0,012	-0,002	1+0,18К
ДП з МЕРО$_1$	Метилові ефіри жирних кислот РО рафінованої високоерукової РОРВ, $\rho_{20°C}$=874 кг/м^3	0,12	-0,06	0,11	0,17	-0,001	-0,001	1+0,2К
ДП з МЕРО$_2$	Метилові ефіри жирних кислот РО рафінованої РОР, $\rho_{20°C}$=874 кг/м^3	0,13	-0,06	0,12	0,19	0,001	-0,001	1+0,23К

Примітки:

1. БЕ – біоетанол; РО – ріпакова олія; RME – ріпакометиловий ефір; РОРВ – ріпакова олія рафінована високоерукова; СОР – соєва олія рафінована; СО – соєва олія; РОР – ріпакова олія рафінована; МЕРО – метилові ефіри жирних кислот РО; РОРВ – ріпакова олія рафінована високоерукова.

Додаток В Методи і засоби вимірювання витрат палив

Таблиця В.1 – Методи вимірювання витрат палив [14, 119, 163]

Метод (витратомір)	Переваги	Недоліки
Змінного перепаду тиску	- порівняно висока точність вимірювання; - зручність і універсальність методу; - можливість вимірювання будь-яких витрат рідини, яка перебуває при різних температурах і тисках; - легкість серійного виготовлення.	- певна втрата енергії потоку; - відносна складність застосування при малих витратах в пульсуючих потоках і потоках, що містять сторонні домішки, а також які знаходяться при параметрах, близьких до рівноважних.
Вихрові	- простота і надійність перетворювача витрати; - відсутність рухомих частин; - великий діапазон вимірювань; - лінійний вимірювальний сигнал; - висока точність вимірювання (± 0,5-1,5%); - стабільність показань; - незалежність показань від тиску і температури; - порівняльна простота вимірювальної схеми.	- неможливо використовувати при малих витратах; - значна втрата тиску (може досягти 30-50 кПа); - роботу вихрових витратомірів можуть порушувати акустичні та вібраційні пульсації.
Парціальні	- порівняльна дешевизна; - можливість застосовування в трубопроводах різного діаметра; - можливість вимірювання витрат пульсуючого потоку.	- підвищена похибка вимірювання.
Тахометричні	- швидкодія; - висока точність (±0,5-2%); - значний діапазон вимірювань.	- зношування рухомих частин; - висока чутливість до механічних домішок; - неможливість вимірювання витрат в’язких речовин.
Камерні	- високий клас точності (± 1%); - невисока вартість; - можливість вимірювання малих витрат; - широкий діапазон вимірбвання витрат рідин з високою в'язкістю.	- складне конструктивне виконання; - висока чутливість до механічних домішок; - складність ремонту.

Продовження табл. В.1

Теплові	- незалежність показань від в'язкості і густини вимірюваної речовини; - великий діапазон вимірюваних швидкостей; - високий клас точності (± 3%); - висока швидкодія.	- велика інерційність; - складність конструкції; - можливе зношування чутливих елементів та зміна градуювання.
Електромагнітні	- незалежність показань від в'язкості і густини вимірюваної речовини; - лінійність шкали; - необхідність в менших довжинах прямих ділянок труб, ніж у інших витратомірів; - висока швидкодія; - можливість вимірювання витрат агресивних рідин; - працездатність при високому тиску середовища (до 100 МПа).	- неможливість використання витратомірів для діелектриків; - наявність додаткової похибки від величини електропровідності рідини.
Акустичні	- висока точність вимірювання (± 0,5-2%); - можливість вимірювання витрати неелектропровідних середовищ; - мала інерційність; - відсутність втрати тиску; - широкий діапазон температур і тисків.	- необхідність значних довжин лінійних ділянок до і після перетворювача; - вплив на показання наявності повітря в потоці; - необхідність контролю відкладень на робочої ділянці трубопроводу; - складність і висока вартість; - обмеження по мінімальній швидкості потоку.
Оптичні	- висока точність; - відсутність контакту з вимірюваною речовиною; - висока чутливість; - мала інерційність; - широкий діапазон виміру швидкостей потоку (0,1-100 м/с).	- вплив на показання повітря в потоці; - необхідність контролю відкладень в трубопроводі на його робочій ділянці; - складність і висока вартість.
Кореляційні	- відсутність втрати тиску; - відсутність контакту з вимірюваною речовиною.	- тривалість процесу вимірювання; - обмежена точність та похибка вимірювання; - перед перетворювачами необхідна пряма ділянка труби, довжина якої після коліна повинна бути не менше 5-10 діаметрів труби.

Продовження табл. В.1

Концентраційні	- похибка вимірювання ± 0,5-1 %.	- складність конструкції; - забруднення вимірюваної рідини речовиною-індикатором; - необхідність заправлення бака речовиною-індикатором.

Таблиця В.2 – Засоби вимірювання витрат палив [14, 119, 163]

Витратомір	Переваги	Недоліки
Змінного перепаду тиску	- порівняно висока точність вимірювання; - зручність і універсальність методу; - можливість вимірювання будь-яких витрат рідини, яка перебуває при різних температурах і тисках; - легкість серійного виготовлення.	- певна втрата енергії потоку; - відносна складність застосування при малих витратах в пульсуючих потоках і потоках, що містять сторонні домішки, а також які знаходяться при параметрах, близьких до рівноважних.
Вихрові	- простота і надійність перетворювача витрати; - відсутність рухомих частин; - великий діапазон вимірювань; - лінійний вимірювальний сигнал; - висока точність вимірювання (± 0,5-1,5%); - стабільність показань; - незалежність показань від тиску і температури; - порівняльна простота вимірювальної схеми.	- неможливо використовувати при малих витратах; - значна втрата тиску (може досягти 30-50 кПа); - роботу вихрових витратомірів можуть порушувати акустичні та вібраційні пульсації.
Парціальні	- порівняльна дешевизна; - можливість застосовування в трубопроводах різного діаметра; - можливість вимірювання витрат пульсуючого потоку.	- підвищена похибка вимірювання.
Тахометричні	- швидкодія; - висока точність (±0,5-2%); - значний діапазон вимірювань.	- зношування рухомих частин; - висока чутливість до механічних домішок; - неможливість вимірювання витрат в’язких речовин.

Продовження табл. В.2

Камерні	- високий клас точності (± 0,2-1%);	- складне конструктивне виконання; - висока чутливість до механічних домішок;
	- невисока вартість; - можливість вимірювання малих витрат; - широкий діапазон виміру; - можливість вимірювання витрат рідин з високою в'язкістю.	- складність ремонту.
Теплові	- незалежність показань від в'язкості і густини вимірюваної речовини; - великий діапазон вимірюваних швидкостей; - високий клас точності (± 0,3-3%); - висока швидкодія.	- велика інерційність; - складність конструкції; - можливе зношування чутливих елементів та зміна градуювання.
Електромагнітні	- незалежність показань від в'язкості і густини вимірюваної речовини; - лінійність шкали; - необхідність в менших довжинах прямих ділянок труб, ніж у інших витратомірів; - висока швидкодія; - можливість вимірювання витрат агресивних рідин; - працездатність при високому тиску середовища (до 100 МПа).	- неможливість використання витратомірів для діелектриків; - наявність додаткової похибки від величини електропровідності рідини.
Акустичні	- висока точність вимірювання (± 0,5-2%); - можливість вимірювання витрати неелектропровідних середовищ; - мала інерційність; - відсутність втрати тиску; - широкий діапазон температур і тисків.	- необхідність значних довжин лінійних ділянок до і після перетворювача; - вплив на показання наявності повітря в потоці; - необхідність контролю відкладень на робочої ділянці трубопроводу; - складність і висока вартість; - обмеження по мінімальній швидкості потоку.

Продовження табл. В.2

Оптичні	- висока точність; - відсутність контакту з вимірюваною речовиною; - висока чутливість; - мала інерційність; - широкий діапазон виміру швидкостей потоку (0,1-100 м/с).	- вплив на показання повітря в потоці; - необхідність контролю відкладень в трубопроводі на його робочій ділянці; - складність і висока вартість.
Кореляційні	- відсутність втрати тиску; - відсутність контакту з вимірюваною речовиною.	- тривалість процесу вимірювання; - обмежена точність та похибка вимірювання витрати (не менше ±1,5-2%); - перед перетворювачами необхідно мати пряму ділянку труби, довжина якої після коліна повинна бути не менше 5-10 діаметрів труби.
Концентраційні	- похибка вимірювання ±0,5-1%.	- складність конструкції; - забруднення вимірюваної рідини речовиною-індикатором; - необхідність заправлення бака речовиною-індикатором.

Додаток Г Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЖИТОМИРСЬКА ОБЛАСНА ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ
ЖИТОМИРСЬКА ОБЛАСНА ВІЙСЬКОВА АДМІНІСТРАЦІЯ
ДЕПАРТАМЕНТ РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ
майдан імені С. П. Корольова, 12, м. Житомир, 10014, тел. (0412) 40-47-16
www.architect-zt.gov.ua, e-mail: drr@drrdep.zht.gov.ua, код ЄДРПОУ 39932654

Від 09.06.2025 № 03/1-1774 На № _____ від _____

Андрію ІЛЬЧЕНКО

вул. Київська, 62, кв.10,

м. Житомир.

Про впровадження основних положень дисертаційної роботи Андрія ІЛЬЧЕНКА

Даним листом засвідчуємо, що результати наукових досліджень та розроблені наукові положення, які опубліковано в наукових статтях, та узагальнено в дисертаційній роботі на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Ільченка Андрія Володимировича за темою «Наукові основи створення методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем витрат рідких біопалив» прийнято до впровадження для обліку об'ємів палив при їх отриманні, зберіганні та використанні, а також в транспортно-технологічних процесах підприємств.

Підтверджуємо економічну ефективність, рівень якої залежить від ступеню автоматизації процесів вимірювання витрат вказаних палив за призначенням на автотранспортних та комунальних підприємствах області.

Заступник директора **Володимир ГРИШКОВЕЦЬ**

Тростенюк
0412 404713

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"ДЕРЖАВНИЙ АВТОТРАНСПОРТНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ І ПРОЕКТНИЙ ІНСТИТУТ"
(ДП "ДЕРЖАВТОТРАНСНДІПРОЕКТ")

просп. Берестейський, 57, м. Київ, 03113, тел./факс (044) 455–6791, тел. 456–3030
E–mail: info@insat.org.ua http://www.insat.org.ua Код ЄДРПОУ 01527695

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Ільченка Андрія Володимировича на тему «Наукові основи створення методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем витрат рідких біопалив»

Результати дисертаційної роботи Ільченка Андрія Володимировича на тему «Наукові основи створення методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем витрат рідких біопалив» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук прийнято до впровадження в Державному підприємстві «Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут» (ДП «ДержавтотрансНДІпроект») в частині розробленої методології визначення розсіювання витрат рідких сумішевих палив на основі бензинів та дизельних палив з різним об'ємним вмістом біологічних компонентів різного складу та розрахунку коефіцієнтів зміни витрат для деяких біопалив, що представляють значний науковий та практичний інтерес для вирішення, зокрема, проблемних питань розроблення експлуатаційних норм витрат сумішевих палив із вмістом біопалив колісними транспортними засобами та іншою технікою.

Запропоновані в рамках дисертаційного дослідження технічні рішення до побудови термоанемометричних витратомірів рідких палив зі змінним фізико-хімічним складом та подальшого вдосконалення технологій в цій сфері також представляють науковий і значний практичний інтерес, з огляду на потенціал підвищення точності вимірювання витрат сумішевих палив та їх компонентів, зокрема, в технологічних процесах виробництва палив, та під час дослідження показників енергетичної ефективності колісних транспортних засобів, що використовують такі сумішеві палива, оптимізації їх конструкції та в цілому підвищення ефективності експлуатації засобів автомобільного транспорту.

В цілому результати дисертаційної роботи мають потенціал сприяння вирішенню завдання збільшення використання відновлюваних джерел енергії дорожнім транспортом та іншою технікою, що є важливою складовою національної енергетичної безпеки, а також виконання Україною міжнародних зобов'язань у сфері зміни клімату.

Заступник директора
з наукової роботи,
доктор технічних наук, доцент Олексій КЛИМЕНКО

МІНЕКОНОМІКИ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ МЕТРОЛОГІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ І УПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМ»
(ДП НДІ «Система»)
вул. М. Кривоноса, 6, м. Львів, 79008, тел. (032) 239-92-00, факс (032) 235-84-49
Web: http: // www.dndi-systema.lviv.ua, e-mail: office@dndi-systema.lviv.ua, institute.systema@gmail.com
П/р UA183052990000026006031021828 у банку АТ КБ «Приватбанк» Відділення « Західне № 23» у м. Львові
МФО 305299, код ЄДРПОУ 04728690

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Ільченка Андрія Володимировича на тему «Наукові основи створення методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем витрат рідких біопалив»

Результати дисертаційної роботи Ільченка Андрія Володимировича на тему «Наукові основи створення методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем витрат рідких біопалив» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук прийнято до впровадження в Державному підприємстві "Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних і управляючих систем" в частині розробленого методу та методології розрахунку показників паливної економічності автомобілів визначенням витрат палив на основі бензинів та дизельних палив з різним об'ємним вмістом біологічних складових та розрахунку коефіцієнтів зміни витрат для деяких біопалив, що представляють значний науковий та практичний інтерес для вирішення, зокрема, питань розроблення експлуатаційних норм витрат біопалив не тільки колісними транспортними засобами, але й іншою технікою, що мають двигуни внутрішнього згорання.

Запропоновані в дисертаційному дослідженні конструктивні рішення побудови термоанемометричних витратомірів палив різного фізико-хімічного складу та подальшого вдосконалення технологій контролю розсіювання витрат вказаних палив також представляють науковий і значний практичний інтерес.

Підвищення точності вимірювання витрат палив (біопалив) в технологічних процесах їх виробництва, під час дослідження показників енергетичної ефективності колісних транспортних засобів, оптимізації їх конструкції в цілому сприятиме підвищенню ефективності експлуатації засобів автомобільного транспорту.

Результати дисертаційної роботи мають потенціал вирішенню завдань використання відновлюваних джерел енергії автомобільною та іншою технікою, що є важливою складовою національної енергетичної безпеки України.

12.05.2025

В.о. директора Олександр ТКАЧЕНКО

UNITED SCIENCE & CAPITAL AB
MEARGING TECHNOLOGY WITH MARKETS
www.uniscap.com
info@uniscap.com
Phone: +46 (0) 735 011 760

ACT

implementation of the main provisions of the dissertation work

With this document, we confirm that the results of scientific research, published in scientific articles and summarized in the dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences Ilchenko Andrii "Scientific foundations of creating a method for calculating fuel efficiency indicators of cars by controlling the consumption of liquid biofuels" have been accepted for use in current and prospective research & development, scientific projects in **United Science & Capital Sweden AB**, related to the economy and consumption of the fuel resource, including those of biological origin. Economic efficiency can be obtained due to the automation of the specified processes.

Halmstad, Sweden Mars, 06 2024

Kujtim Hyseni

Chief Executive Officer

United Science & Capital

Підприємство з іноземними інвестиціями
Товариство з обмеженою відповідальністю
12402 вул. Садова 4, с. Оліївка,
Житомирський р-н, Житомирська обл.
ЄДРПОУ 31603510
тел./факс +38 04134 43256, 43535
info@danico.com.ua

DANICO

Enterprise with foreign investments
Company with limited liability
12402 Sadova Str. 4
Zhytomyr distr., Zhytomyr reg.
EDRPOU 31603510
Tel./fax +38 04134 43256,43535
info@danico.com.ua

АКТ

впровадження основних положень дисертаційної роботи

Ільченка Андрія Володимировича

АКТ

Впровадження основних положень дисертаційної роботи

Ільченка Андрія Володимировича

Даним документом підтверджуємо, що результати наукових досліджень, які опубліковано в фахових і закордонних наукових статтях, представлено в тезах міжнародних наукових конференцій та узагальнено в дисертаційної роботі на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Ільченка Андрія Володимировича «Наукові основи створення методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем витрат рідких біопалив» прийнято до використання в технологічних та виробничих процесах для обліку витрат та в процесі зберігання паливо-мастильних матеріалів.

Директор «Danico» Іваницький В.І.

Додаток Д Протокол проведення випробувань автомобіля

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Перший проректор,
проректор з наукової роботи ЖДТУ
д.т.н., професор
_____ І.І. Грабар
“___” _____ 200 р.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Зам. директора ДП МО
„Укрвійськбуд – 75 УНР”
_____ М.С. Пустовіт
“___” _____ 200 р.

ПРОТОКОЛ

проведення випробувань автомобіля, що працює на сумішах дизельного палива і ріпакової, кукурудзяної, соняшникової, оливкової олій та дизельного палива і етилового спирту різних концентрацій.

Комісія в складі: к.т.н., доц. Ільченко А.В., аспірант Кур’ята В.П., аспірант Ломакін В.О., аспірант Бегерський Д.Б., водій Гальцев С.В.

03.11.2006 р. на базі лабораторії експлуатації автомобілів Житомирського державного технологічного університету, провела випробування непрозорості відпрацьованих газів автомобіля, що належить Державному підприємству міністерства оборони ”Укрвійськбуд”-75 УНР, з використанням палив: дизельне паливо, дизельне паливо + 20% ріпакової олії, дизельне паливо + 40% ріпакової олії, дизельне паливо + 20% кукурудзяної олії, дизельне паливо + 40% кукурудзяної олії, дизельне паливо + 20% соняшникової олії, дизельне паливо + 40% соняшникової олії, дизельне паливо + 20% оливкової олії, дизельне паливо + 40% оливкової олії, дизельне паливо + 4% етилового спирту, дизельне паливо + 8% етилового спирту (домішки вказані в об’ємних відсотках).

Характеристика автомобіля:

- марка МАЗ-5335;
- державний номер 52-45 С1;
- шасі 4236011
- рік випуску 1990;
- пробіг після капітального ремонту 62380 км.

Атмосферні умови:

- температура повітря -1,3 °С;
- атмосферний тиск 740 мм.рт.ст.

Результати випробувань зведені в таблицю 1.

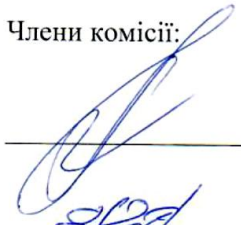
Таблиця 1.

Вимірювання	Результати вимірювання димності ВГ дизеля при роботі на різних паливах, K, м$^{-1}$										
	Дизельне паливо	Дизельне паливо +20% ріпакової олії	Дизельне паливо +40% ріпакової олії	Дизельне паливо +20% кукурудзяної олії	Дизельне паливо +40% кукурудзяної олії	Дизельне паливо +20% соняшникової олії	Дизельне паливо +40% соняшникової олії	Дизельне паливо +20% оливкової олії	Дизельне паливо +40% оливкової олії	Дизельне паливо + 4% етилового спирту	Дизельне паливо + 8% етилового спирту
Холостий хід	0,24	0,17	0,2	0,17	0,13	0,2	0,2	0,29	0,17	0,17	0,3
Режим прискорення											
1.	0,9	0,64	0,66	1,28	1,48	1,38	1,7	1,43	0,81	1,14	1,07
2.	0,45	0,32	0,37	0,28	0,43	0,49	0,42	0,62	0,47	0,43	0,49
3.	0,42	0,3	0,35	0,35	0,36	0,27	0,42	0,43	0,36	0,31	0,51
4.	0,47	0,33	0,35	0,28	0,43	0,31	0,31	0,47	0,36	0,29	0,46
5.	0,47	0,33	0,36	0,24	0,36	0,35	0,42	0,47	0,36	0,3	0,49
6.	0,44	0,31	0,36	0,24	0,36	0,27	0,31	0,45	0,3	0,43	0,76
7.	0,31	0,22	0,3	0,28	0,43	0,27	0,38	0,47	0,29	0,3	0,61
8.	0,42	0,21	0,34	0,28	0,49	0,24	0,38	0,44	0,3	0,4	0,53
9.	0,42	0,26	0,32	0,32	0,47	0,24	0,38	0,51	0,3	0,3	0,53
10.	0,43	0,28	0,29	0,32	0,42	0,27	0,48	0,45	0,36	0,36	0,57
Kср$_{7\text{-}10}$	0,4	0,24	0,3	0,3	0,45	0,25	0,41	0,47	0,31	0,34	0,56

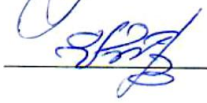
Kср$_{7\text{-}10}$ – середнє арифметичне чотирьох останніх вимірювань.

Дослідження непрозорості відпрацьованих газів автомобіля проводились згідно ДСТУ 4276:2004 „Норми і методи вимірювань димності відпрацьованих газів автомобілів з дизелями або газодизелями" за допомогою вимірювача переносного непрозорості відпрацьованих газів автомобілів ИНА-109 2.850.260 №15700 (остання перевірка 21.09.2006 р.).

Члени комісії:



_____ Ільченко А.В.



_____ Кур'ята В.П.

_____ Ломакін В.О.

_____ Бегерський Д.Б.

_____ Гальцев С.В.

Додаток Е. Публікації здобувача за темою дисертації, відомості про апробацію дисертаційних досліджень

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ільченко А. В., Колодницька Р.В., Кур'ята В.П. Вплив добавок розлинних олій на вміст сажі у відпрацьованих газах двигуна автомобіля. Вісник СНУ ім. Даля. Луганск, 2005. № 6(88). С. 225–229.

2. Ільченко А. В., Кур'ята В.П. Математична модель відкладання сажі у випускному тракті двигуна автомобіля. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2006. № 3(38). С. 20–24.

3. Ільченко А.В., Кур'ята В.П. Вплив домішок рослинних олій до дизельного палива на димність відпрацьованих газів двигуна. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2007. № 1(40). С. 29–34.

4. Ільченко А. В. Теоретичні основи нормування витрат моторних палив з високооктановими кисневмісними добавками. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2004. № 1(28). С. 32–38.

5. Грабар І. Г., Ільченко А. В., Колодницька Р. В. Зміна витрати моторних палив з добавками ріпакової олії. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2004. № II(29). С. 19-23.

6. Ільченко А.В., Безвесільна О.М., Тростенюк Ю.В. Передача тепла в термоанемометричному витратомірі біопалив. *Вісник Східноєвропейський журнал передових технологій*. Харків, 2014. С. 47–51. doi:10.15587/1729-4061.2014.28638

7. Ільченко А. В. Теоретичні передумови зменшення витрат двокомпонентних моторних палив. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2004. № 4(31). С. 1–8.

8. Ільченко А. В., Кур'ята В. П. Математична модель витрати палива автомобіля з урахуванням збіднення паливо-повітряної суміші (на

прикладі моторних палив з домішками олій рослинного походження). *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2005. № 1(32). С. 15–19.

9. Ільченко А. В. Колодницька Р. В., Кур'ята В. П. Експериментальні дослідження зміни витрат моторних палив з добавками ріпакової олії. *Автомобільний транспорт. Збірник наукових праць*. Харків, 2005. № 16. С. 267–269.

10. Ільченко А. В., Романова А. О. Урахування властивостей двокомпонентних палив у процесі вимірювання їх витрати термоанемометричним витратоміром. *Вісті автомобільно-дорожнього інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет».* Донецьк, 2007. № 1(4). С. 106–109.

11. Грабар І. Г., Ільченко А. В., Кришевський М. Б., Кур'ята В. П. Експериментальні дослідження провідності палива БІО-100 з метою створення системи контролю його якості. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наукових праць*. Житомир, 2007. Випуск 5. ч. 1. С. 151–157.

12. Ільченко А. В. Обгрунтування вибору моторних біопалив за умови зменшення їх витрат двигуном автомобіля. *Вісник ЖДТУ*. Житомир, 2008. № 2(45). С. 32–36.

13. Ільченко А. В. Перспективи застосування біодизельного палива в автомобільних двигунах. *Вісник НТУ*. Київ, 2013. № 27. С. 370–373.

14. Безвесільна О. М., Ільченко А. В., Ткачук А. Г., Пархоменко С. О. Методи вимірювання витрат рідини та конструкції витратомірів. *Вісник Інженерної академії України*. 2013. № 3–4. С. 216–222.

15. Ільченко А. В., Безвесільна О. М., Тростенюк Ю. В. Зміна радіального теплового потоку термоанемометричного витратоміра біопалив двигуна внутрішнього згоряння. *Вісник НТУ*. Київ, 2013. № 28. С. 186–191.

16. Тростенюк Ю. В., Безвесільна О. М., Ільченко А. В. Моделювання осьового теплового потоку трубки термоанемометричного

витратоміра біопалив. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки».* Луцьк, 2014. № 46. С. 538–545.

17. Ільченко А.В., Тростенюк Ю.В., Тростенюк Ю.І. Моделювання осьового теплового потоку термоанемометричного витратоміра в залежності від вмісту олій рослинного походження в дизельному паливі. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал*. Луцьк, 2014. № 2. С. 61–67.

18. Ільченко А. В. Вплив деяких параметрів конструкції теплового витратоміра палива на передачу тепла в ньому. *Вісник машинобудування та транспорту ВНТУ*. Вінниця, 2021. Том 13. № 1. С. 54–58.

19. Ільченко А. В., Багінський О. О. Шляхи зменшення похибки вимірювання витрат палив тепловим витратоміром. *Технічна інженерія. Державний університет «Житомирська політехніка».* Житомир, 2023. № 1 (91). С. 207–213.

20. Ільченко А. В. Методологічні основи визначення і контролю витрат біопалив в процесі руху автомобіля. *Вісник машинобудування та транспорту ВНТУ*. Вінниця, 2024. Том 19. № 1 (2024). С. 61–67. DOI: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-61-67

21. Замула І. В., Ільченко А. В., Травін В. В. Економічні перспективи використання біопалива в контексті реалізації концепції сталого розвитку. *Ефективна економіка*. 2024. № 11. DOI: http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.11.8

22. Ilchenko, A., Bezvesilna, E. Development of calorimetric motor fuel flowmeter with increased metering accuracy by adjusting the inlet temperature. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014, 6(7). p. 50–54. (Scopus, Q3)

23. Korobiichuk, I., Bezvesilna O., Ilchenko A., … Nowicki M., Szewczyk R. Calorimetric flow meter of motor fuel with inlet temperature regulation.

4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies. 2017. p. 975–979. (Scopus, Q3)

24. Bezvesilna O., Kamiński M., Ilchenko A. Heat transfer in the thermo-anemometric flowmeter for biofuels. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. p. 505-511. (Scopus, Q4)

25. Korobiichuk I., Bezvesilna O., Ilchenko A., Trostenyuk Y. Thermoanemometric flowmeter of biofuels for motor transport. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. p. 443-448. (Scopus, Q4)

26. Korobiichuk I., Bezvesilna O., Ilchenko A., ...Nowicki M., Szewczyk R. A mathematical model of the thermo-anemometric flowmeter. *Sensors*. Switzerland, 2015. 15(9). p. 22899–22913. (Scopus, Q1)

27. Korobiichuk I., Ilchenko A. Optimal Design Parameters of Thermal Flowmeter for Fuel Flow Measurement. *Sensors*. 2022. 8882. doi.org/10.3390/s22228882. (Scopus, Q1)

28. Ilchenko A., Korobiichuk I. Methods of Reduction of Fuel Consumption Measurement Error by Thermo-Anemometric Flow Meter. Automation 2024: Advances in Automation, Robotics and Measurement Techniques. AUTOMATION 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1219. *Springer, Cham.* https://doi.org/10.1007/978-3-031-78266-4_27 (Scopus)

29. Ільченко А. В. Багінський О. О. Вибір конструкції та принципу дії витратомірів для їх використання на транспортних засобах. *Modern engineering and innovative technologies*. Німеччина, 2021. Випуск № 17. С. 54–62, DOI: 10.30890/2567-5273.2021-17-02-065

30. Ільченко А. В. Аналіз зміни чутливості термоанемометричного витратоміра біопалив. *SWorldJournal*. Болгарія, 2024. № 24. С. 151–160. DOI: 10.30888/2663-5712.2024-24-00-056

Патенти на винаходи:

31. Безвесільна О.М., Подчашенський Ю.О., Ільченко А.В., Шавурський Ю.О. Високоточний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації: пат. 91160 Україна: МПК 2009 G01F1/68, G01F1/696, F02M5/00. № 200906515; заявл. 22.06.09; опубл. 26.06.10, Бюл. № 12. 4 с.

32. Безвесільна О.М., Ільченко А.В., Подчашенський Ю.О., Шавурський Ю.О. Калориметричний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації: пат. 90985 Україна: МПК 2009 F02M5/00. № 200910565; заявл. 19.10.09; опубл. 10.06.10, Бюл. № 11. 4 с.

33. Безвесільна О.М., Ільченко А.В. Калориметричний витратомір моторного палива з підвищеною точністю вимірів: пат. 106858 Україна: МПК 2014.01 F02M5/00, G01F1/68, G01F1/696, G01F15/00. № 201314550; заявл. 12.12.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 19. 4 с.

34. Безвесільна О.М., Ільченко А.В., Тростенюк Ю.О. Калориметричний витратомір моторного палива з підвищеною точністю вимірів: пат. 106950 Україна: МПК 014.01 F02M5/00, G01F1/68. № 201313387; заявл. 18.11.13; опубл. 27.10.14., Бюл. № 20. 8 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

35. Ільченко А. В. Особливості процесу вимірювання витрат біопалив багатосекційним термоанемометричним витратоміром. *Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури*: Автошляховик України. Збірка тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2023. С. 273–276.

36. Ільченко А. В., Кур’ята В. П. Етанол як третя компонента при використанні дизельних палив з домішками олій рослинного походження. *XXXI Науково-практична міжвузівська конференція, присвячена Дню університету*. Житомир, 2006. С. 20.

37. Kolodnitcka R., Ilchenko A. An investigation of droplet mean diameters and fuel consumption for straight vegetable oil. *Mechanics 2006* : Proceedings of the International Scientific Conferens. Rzeszow University of Technology. 2006. № 231. P. 95–102.

38. Ільченко А. В., Колодницька Р. В. Аналіз моделей викидів сажі, оксидів азоту та витрати палив у застосуванні до біопалив у дизелях. *Практична космонавтика і високі технології*: тези VI науково-практичної конференції, присвяченої 100–річчю з дня народження академіка С. П. Королева. Житомир, 2007. С. 83.

39. Ільченко А. В. Зміна чутливості термоанемометричного витратоміра біопалива. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. Вінниця, 2024. С. 124-125.

40. Безвесільна О.М., Ільченко А.В., Тростенюк Ю.В. Програмно-апаратний комплекс для вимірювання витрат моторних біопалив термоанемометричним методом. *Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, приявченої Дню науки*. Житомир, 10-12 травня 2017 р. https://conf.ztu.edu.ua/tezy-do-dnya-nauky-10-12-travnya-2017-r/

41. Колодницька Р. В., Ільченко А. В. Зв’язок між коефіцієнтом та критерієм зміни витрат двокомпонентних палив для двигунів внутрішнього згоряння. *XXXIII Науково-практична міжвузівська конференція, присвяченої Дню університету*. Житомир, 2008. С. 16.

42. Grabar I.G., Kolodnytska R.V., Arystarkhova E.O., Ilchenko A.V. The problem of clean ecological diesel fuels introducing on base of rapeseed oil. *AMMA 2002* : The National Conferens with International Participation Automobile, Environment fnd Agricultural Machinery. Cluj-Napoca, 2002. P. 255-256

43. Ільченко А.В. Похибка розробленого методу визначення та контролю витрат біопалив двигуном автомобіля. *Проблеми та*

перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції. Вінниця, 2025. С. 141–142.

44. Ільченко А. В. Контроль витрат біопалив як інструмент підвищення ефективності експлуатації засобів автомобільного транспорту. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту:* тези XVII Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир, 2024. С. 86–87.

45. Ільченко А. В. Тростенюк Ю. В., Тростенюк Ю. І. Вплив в'язкості біопалив на точність вимірювання їх витрат термоанемометричним витратоміром. *Всеукраїнська науково-практична on-line конференція аспірантів, молодих учених та студентів, присвячена Дню науки*. Житомир, 2015. С. 37–38.

46. Ільченко А. В. Шляхи покращення функціональних можливостей термоанемометричного витратоміра біопалив. *Синергетика, фрактали і новітні технології*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир, 2024. С. 106–110.

47. Ільченко А.В. Перевірка адекватності методу розрахунку показників паливної економічності автомобілів контролем розсіювання витрат бензинів з домішками біоетанолу. *Підвищення якості продукції машинобудівних та ремонтних підприємств*: IV Всеукраїнський науково-практичний онлайн-семінар. Харків, 2025. С. 41-42.

48. Безвесільна О. М., Ільченко А. В. Особливості застосування і вимірювання витрат біопалив дизельними двигунами, що оснащено термоанемометричними витратомірами. *Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців*: наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2017. С. 186–187.

49. Безвесільна О. М., Ільченко А. В., Тростенюк Ю. В. Експериментальний зразок термоанемометричного витратоміра моторних біопалив для двигунів внутрішнього згоряння. *Проблеми розвитку транспорту і логістики*: збірник наукових праць VII-ої Міжнародної науково-практичної конференції. Одеса, 2017. С. 171–173.

50. Безвесільна О. М., Ільченко А. В., Ткачук А. Г., Багінський О. О. Спосіб розширення діапазону вимірювання витрат палив двигунів транспортних засобів термоанемометричним витратоміром. *Новітні технології розвитку автомобільного транспорту*: наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції, 16-19 жовтня 2018 р. Харків, 2018. С. 74–77.

51. Kolodnytska R. Kravchenko A., Ilchenko A., Vasylyev O. Fuel cell vehicles in Ukrainian perspective. *International Conference on Sustainable Materials and Energy Technologies*, 12-13 September, Coventry UK, 2019. P. 30.

52. Bezvesilna H., Ilchenko A., Tytarenko V., Krushynska N. Increasing accuracy of motor fuel consumption via calorimetric flowmeter. *Dynamics of the development of world science*: Abstracts of I International Scientific and Practical Conference. Vancouver, Canada, 25-27 September, 2019. P. 239-247.

53. Багінський О. О., Ільченко А. В. Визначення параметрів руху дизельного палива в двосекційному термоанемометричному витратомірі. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: XIII Міжнародна науково-практична конференція. Житомир. 2020. URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-ontent/uploads/2020/11/4.pdfhttps://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/11/4.pdf

54. Ільченко А. В. Удосконалення конструкції теплового витратоміра рідких моторних палив. *Проблеми та перспективи розвитку*

автомобільного транспорту: XI Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція. Вінниця, 2023. С. 136–138.

55. Багінський О. О., Брожко А. М., Дивак С. О., Ільченко А. В. Вибір конструкції та принципу дії витратоміра палива для використання на транспортних засобах. *Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвячена Дню науки.* Житомир, 2019. С. 192–194, URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/05/7-tarnsportni-tehnologiyi-.pdf

56. Ільченко А. В. Поліпшення точності вимірювання витрат моторних палив тепловим витратоміром. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези XVI Міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 2023. С. 149-151.

57. Ільченко А. В., Багінський О. О. Моделювання процесу руху палива в трубці теплового витратоміра. *78-а Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів НТУ*: тези доповідей. Київ, 2022. С. 33. DOI: 10.33744/2786-6459-2022-78.

58. Ільченко А. В., Поліщук Д. С. Зменшення похибки виміру витрат палив тепловим витратоміром вибором його конструктивних параметрів. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем*: тези конференції. Рівне, 2022. С. 249–251.

59. Ільченко А. В. Вплив геометричних параметрів трубки теплового витратоміра на радіальний тепловий потік. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези XV Міжнародної науково-практичної конференції державного університету «Житомирська політехніка». Житомир, 2022. С. 49–50.

60. Ільченко А. В. Буздуган К. А. Вплив діаметра нагрівального елемента теплового витратоміра на похибку виміру витрати палива автомобіля. *Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів і машин*: тези міжнародної конференції. Київ, 2022. С. 61–63. DOI: 10.33744/978-966-632-316-6-2022-1

61. Ільченко А. В. Перевірка впливу діаметра нагрівального елемента теплового витратоміра на похибку вимірювання витрати палива ДВЗ. *Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури: виклики воєнного часу*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2022. С. 276-279.

62. Бегерський Д .Б., Ільченко А. В. Моделювання процесів руху палива в багатосекційному тепловому витратомірі. *79-а Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів НТУ*: тези доповідей. Київ: НТУ, 2023. С. 66–67. DOI: 10.33744/2786-6459-2023-79

63. Ільченко А. В. Тепловий витратомір моторних палив з розширеним діапазоном виміру витрат. *Міжнародна науково-практична конференція Auto-TRAK-2023*: тези доповідей. Київ, 2023. С. 111–113.

64. Безвесільна О.М., Ільченко А.В. Термоанемометричний витратомір біопалива для автомобільних двигунів. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 2017. С. 66–68.

Відомості про апробацію дисертаційних досліджень

Теоретичні, методичні та практичні положення дисертації доповідались на конференціях, семінарах, симпозіумах та подані у вигляді тез:

- міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури» (м. Київ, ДержавтотрансНДІпроект, 5-7 грудня 2023 р., дистанційна участь);
- XXXI науково-практичної міжвузівської конференції, присвяченої Дню університету (м. Житомир, ЖДТУ, 14-16 березня 2006 р., очна участь);
- XXXIII науково-практичної міжвузівської конференції, присвяченої Дню університету (м. Житомир, ЖДТУ, 18-19 березня 2008 р., очна участь);
- Proceedings of the International Scientific Conferens «Mechanics 2006» (Rzeszow, Rzeszow University of Technology, July 2006, заочна участь);
- VI науково-практичної конференції, присвяченої 100–річчю з дня народження академіка С.П. Королева «Практична космонавтика і високі технології» (м. Житомир, ЖДТУ, 9-11 січня 2007 р., очна участь);
- XI міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця, ВНТУ, 13-14 квітня 2023 р., дистанційна участь);
- XII міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця, ВНТУ, 16-18 квітня 2024 р., дистанційна участь);
- XIII міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця, ВНТУ, 15-17 квітня 2025 р., заочна участь);
- всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки (м. Житомир, ЖДТУ, 13-14 травня 2015 р., дистанційна участь);
- всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки (м. Житомир, ЖДТУ, 10-12 травня 2017 р., дистанційна участь);

- The National Conferens with International Participation Automobile, Environment fnd Agricultural Machinery «AMMA 2002» (Cluj-Napoca, october 2002, дистанційна участь);

- міжнародної науково-практичної конференції «Синергетика, фрактали і новітні технології» (м. Житомир, ПНУ, 3-4 червня 2024 р., очна участь);

- IV Всеукраїнському науково-практичному онлайн-семінарі «Підвищення якості продукції машинобудівних та ремонтних підприємств» (м. Харків, ХНАДУ, 29 травня 2025 р., дистанційна участь);

- міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців» (м. Харків, ХНАДУ, 19-20 жовтня 2017 р., заочна участь);

- VII-ої міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми розвитку транспорту і логістики» (м. Одеса, ОНМУ, 26-28 квітня 2017 р., заочна участь);

- міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології розвитку автомобільного транспорту», м. Харків, ХНАДУ, 16-19 жовтня 2018 р., заочна участь);

- International Conference on Sustainable Materials and Energy Technologies (Coventry, UK, Coventry University, 12-13 September 2019, очна участь);

- I International Scientific and Practical Conference «Dynamics of the development of world science» (Vancouver, Canada, 25-27 September, 2019, заочна участь);

- XIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка», 26-28 жовтня 2020 р., очна участь);

- XV міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка», 24-26 жовтня 2022 р., очна участь);

- XVII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Житомир, Державний уніветситет «Житомирська політехніка», 21-23 жовтня 2024 р., очна участь);

- всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвячена Дню науки (м. Житомир, ЖДТУ, 15-17 травня 2019 р., дистанційна участь);

- X міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця, ВНТУ, 23-25 жовтня 2017 р., очна участь);

- XVI міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», (м. Вінниця, ВНТУ, 23-25 жовтня 2023 р., дистанційна участь);

- 78-й наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів НТУ (м. Київ, НТУ, 2022 р., заочна участь);

- 79-й наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів НТУ (м. Київ, НТУ, 2023 р., заочна участь);

- конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем» (м. Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування, 19-20 жовтня 2022 р., дистанційна участь);

- міжнародної конференції «Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів і машин» (м. Київ, НТУ, 16-17 листопада 2022 р., заочна участь);

- міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури: виклики воєнного часу» (м. Київ, ДержавтотрансНДІпроект, 14-16 грудня 2022 р., дистанційна участь);
- міжнародної науково-практичної конференції «Auto-TRAK-2023» (м. Київ, НУБіП України, 4-5 травня 2023 р., дистанційна участь);