

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
”КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**КОЛОСОВ О. Є., РЯБЦЕВ Г. Л., СІВЕЦЬКИЙ В. І.,
СІДОРОВ Д. Е., ПРИСТАЙЛОВ С. О.**

ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ЗАСОБИ ПРИГОТУВАННЯ БІОПАЛИВА

Видавництво «СІЧКАР»

КИЇВ 2010

*Рекомендовано вченою радою ІХФ НТУУ «КПІ»
(протокол № 6 від 14.06.10)*

Колосов, О. Є.

К77 Високоєфективні засоби приготування біопалива / О. Є. Колосов, Г. Л. Рябцев, В. І. Сівецький, Д. Е. Сідоров, С. О. Пристайлов. – К. : Січкара, 2010. – 152 с.

ISBN 966-622-289-9

У монографії розглянуто напрями підвищення ефективності приготування біопалива. Проаналізовано економічні, технічні та екологічні аспекти виробництва біоетанолу й біодизельного палива. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень щодо удосконалення технологічних засад виробництва паливних сумішей на основі ріпакової олії, зокрема з використанням гідродинамічної та ультразвукової кавітації.

Монографія може бути корисною для спеціалістів і науковців, що займаються дослідженням, розробленням і виробництвом засобів для інтенсифікації процесів приготування біопалива, а також аспірантів і студентів вищих навчальних закладів.

ISBN 966-622-289-9

ББК 35.В75

Відповідальний редактор – Панов Є. М., д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування НТУУ «КПІ»

Рецензенти: Сухенко Ю. Г., д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК НУБіП України,

Назаренко І. І., д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів КНУБА

© Колосов О. Є., Рябцев Г. Л., Сівецький В. І., Сідоров Д. Е., Пристайлов С. О., 2010

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Економічні, технічні та екологічні аспекти виробництва біоетанолу.....	12
1.1 Що таке біоетанол?	12
1.2 Переваги й недоліки біоетанолу.....	12
1.3 Технології одержання етанолу	14
1.4 Сировина для одержання етанолу.....	17
1.5 Планування і будівництво виробництв паливного біоетанолу.....	19
1.6 Обсяги виробництва паливного біоетанолу	21
1.7 Застосування етанолу як палива.....	24
1.8 Стандарти на суміші бензину з етанолом	26
1.9 Чому в Україні майже не застосовують паливний біоетанол	28
1.10 Висновки	30
2 Особливості виробництва біодизельного палива	31
2.1 Що таке біодизель?	31
2.2 Переваги й недоліки біодизеля.....	31
2.3 Сировина для біодизеля	32
2.4 Технологія виробництва біодизеля.....	34
2.5 Стандарти на біодизельне паливо	37
2.6 Планування й будівництво біодизельних заводів	40
2.7 Застосування біодизельного палива	42
2.8 Обсяги виробництва біодизельного палива.....	43
2.9 Можливості вироблення біодизеля з мікр водоростей	47
2.10 Висновки.....	50
2.11 Рекомендації щодо розвитку біопаливної галузі України.....	51
3 Аналіз технічних засобів для виробництва біодизельного палива.....	54
3.1 Доцільність застосування кавітації для інтенсифікації хіміко-технологічних процесів.....	54
3.1.1 Види кавітації та напрями її практичного застосування.....	54
3.1.2 Застосування кавітаційних технологій для інтенсифікації виробництва біопалива	58
3.2 Напрями вдосконалення базових технологій виробництва біодизельного палива	64
3.3 Аналіз деяких дослідно-промислових технічних засобів для виробництва біодизельного палива	69
3.3.1 Вітчизняні технічні засоби.....	69
3.3.2 Зарубіжні технічні засоби.....	73
3.4 Висновки.....	79
4 Ефективні технічні засоби для одержання олії	80
4.1 Олійні преси.....	80
4.1.1 Гвинтові малотоннажні олійні преси.....	80

4.1.2 Інтегровані олійні преси	80
4.1.3 Великотоннажні олійні преси.....	82
4.2 Ефективні технічні засоби для очищення олії від домішок	83
4.2.1 Технологічні засади двоступеневого очищення олії.....	83
4.2.2 Установа для комплексної очищення олії	86
4.3 Висновки.....	88
5 Експериментальні дослідження гідродинаміки кавітаційних апаратів....	89
5.1 Стенд для досліджень гідродинамічних характеристик кавітаторів в обмежених потоках на режимах штучної кавітації.....	89
5.2 Дослідження гідродинаміки кавітаційного потоку	94
5.2.1 Параметри моделювання кавітаційних процесів.....	95
5.2.2 Розміри кавітаційної каверни.....	95
5.3 Динаміка виносу газу з вентильованих каверн	98
5.4 Ежекція на режимах штучної кавітації.....	102
5.5 Кавітаційний опір на режимах природної та штучної кавітації	102
6 Огляд кавітаційних апаратів, призначених для інтенсифікації технологічних процесів	104
7 Удосконалення базових технологічних засад виробництва паливних сумішей із використанням гідродинамічної кавітації.....	113
7.1 Світова практика використання ріпакової олії для виробництва біопалива	113
7.2 Аналіз технологічних засад виробництва біодизельного палива кавітаційними методами	116
7.3 Удосконалення технологічних засад виробництва біодизельного палива кавітаційними методами	117
7.3.1 Дослідження властивостей біопаливних сумішей.....	119
7.4 Кавітаційний процесор компанії «БіоСам».....	122
7.5 Автоматизовані комплекси MIXER	125
7.6 Про дію біопалива на двигуни.....	126
7.7 Висновки.....	127
8 Ефективність виробництва біодизеля з використанням ультразвуку	129
8.1 Доцільність застосування ультразвуку.....	129
8.2 Періодичний процес виробництва	129
8.3 Неперервний процес виробництва	131
8.4 Швидкість реакції ультразвукової переетерифікації біодизеля.....	132
8.5 Методика розрахунку низькочастотного ультразвукового кавітаційного апарата з циліндричною проточною камерою	133
8.6 Економічні й екологічні переваги ультразвукового виробництва біодизеля.....	141
8.7 Висновки.....	142
Висновки.....	143
Перелік посилань.....	145

ВСТУП

Біоенергетичний потенціал України є величезним [1-5]. Сприятливе поєднання кліматичних умов, значний аграрний сектор, дешева й доступна робоча сила роблять Україну надзвичайно привабливою для інвесторів. Проте якісні зміни в національній економіці можливі лише за наявності серйозної політичної волі та залучення всіх ключових гравців: від депутатів і членів уряду, виробників устаткування й переробників до компаній, що випускають гібридні автомобілі, і фермерів, які вирощують сировину.

Україна має пройти довгий шлях, до того як біопаливо зможе допомогти їй у розв'язанні багатьох економічних та екологічних проблем. Значною допомогою в цьому є виробничий і ринковий досвід, накопичений двома десятками країн - насамперед, членами ЄС, які реалізують політику обов'язкового використання біопалива.

Серйозне вивчення такого досвіду та його адаптація до політичних та економічних реалій України, мають стани першими серйозними кроками на шляху до плідного співробітництва між ключовими гравцями біопаливного ринку [1-5].

Якщо Україна має намір здійснити прорив у біоенергетиці, їй доведеться надати виробникам біопалива значні податкові пільги, як це було у ФРН. Повне звільнення від оподаткування та врахування інтересів аграріїв під час розроблення регіональної політики створили сприятливі умови для біопалива у Франції.

Якщо зробити основним двигуном розроблення політики екологічні міркування, незамінним буде досвід Швеції, де розвиток цієї галузі нерозривно пов'язаний зі сприянням використанню чистих технологій на транспорті. Натомість, досвід Мальти свідчить, що випускати біопаливо можна навіть у разі серйозного дефіциту ресурсів.

При цьому неважко помітити, що в історії біопаливних успіхів Франції, ФРН, Іспанії, Швеції та інших країн існують кілька спільних рис. Найважливіша з них – тривала податкова підтримка галузі, яку надавали, утім, по-різному та в різних обсягах. Приміром, якщо у Франції діяли податкові пільги для обмежених обсягів біопалива, причому їхня величина ретельно розраховували, то в Німеччині від оподаткування звільняли необмежені обсяги біопалива.

Друга риса – присутність у кожній із країн-лідерів організацій, що лобювали розвиток галузі. Наприклад, у Франції і ФРН це сільськогосподарські підприємства, в Іспанії – транснаціональна Abengoa Bioenergy Business Group. Чималу роль відіграє й залучення до біопаливних програм нафтових компаній чи, принаймні, автовиробників.

До речі, у Німеччині, де далеко не всі нафтові компанії підтримували політику держави в цій сфері, саме автовиробникам, які випускали біопаливні автомобілі, і заправникам, що розвивали відповідну інфраструктуру, вдалося досягти значних успіхів. Так само важливою є готовність провід-

них політичних сил країни підтримувати впровадження й використання біопалива. У Швеції та Німеччині такими силами стали ліві партії й «зелені», у Франції та Іспанії – партії, які висловлювали інтереси фермерів і сільськогосподарських товаровиробників.

Таблиця 1 – Чинні біопаливні програми

Країна	Основна вимога програми
Австралія	350 млн л біопалива з 2010 р. (етанол + біодизель)
Аргентина	5 % до 2010 р.
Бразилія	5 % у споживанні палива з 2010 р., виробляти 12 млрд л етанолу з 2020 р.
Данія	10 % біопалива з 2020 р. (етанол + біодизель)
ЄС	5,75 % біопалива до 2010 р. (етанол + біодизель)
Зімбабве	10 % від загального споживання дизельного палива
Індія	5 % етанолу в споживаному паливі; виробляти 60 млн т біопалива з 2030 р.
Індонезія	10 % біопалива з 2010 р. (етанол + біодизель)
Ірландія	5,75 % біопалива з 2009 р. (етанол + біодизель), 10 % із 2020 р.
Канада	5 % у моторному й пічному паливі з 2012 р.
Китай	виробляти щорічно 8 млн т біопалива з 2020 р.
Колумбія	10 % етанолу в споживаному паливі у великих містах
Малайзія	20 % від загального споживання дизельного палива
Нова Зеландія	5 % біопалива з 2008 р. (етанол + біодизель)
Південна Корея	0,5 % від загального споживання дизельного палива з 2006 р., 5 % – із 2008 р.
Португалія	10 % біопалива в моторному паливі з 2010 р.
США	виробляти 7,5 млрд л етанолу з 2012 р.
США (Мінесота)	2 % у споживаному дизельному паливі
Таїланд	5 % у споживаному паливі з 2011 р., 10 % – до 2012 р.
Тайвань	1 % біопалива в моторному паливі з 2008 р., 2 % – із 2010 р.
Філіппіни	1 % біопалива в моторному паливі з 2007 р., 2 % – із 2008 р.
Франція	7 % біопалива з 2010 р. (етанол + біодизель)
ФРН	5 % біопалива в моторному паливі з 1 січня 2007 р.
Японія	із 2007 р. дозволено 5 % біодобавок у дизельному паливі, 3 % етанолу в бензині

Чехія, Польща й Словаччина також розглядали виробництво біопалива як захід, здатний підтримати сільське господарство. І ці країни застосували податкову підтримку, та її мінливість негативно позначилася на біопаливній індустрії. Не сприяли її розвитку й затримки з прийняттям більшості анонсованих законів, і безліч бюрократичних перешкод під час виробництва й використання біопалива. До того ж (особливо в Польщі), були відсутні чіткі стандарти якості біопалива й методи її контролю, що створило негативний імідж цьому продукту, оскільки споживачі були не впевнені у його привабливості.

Велика Британія й Нідерланди обрали інші підходи, вважаючи, що затрати на розвиток нових ринків не окупаються. Втім, це не завадило обом країнам розробити та здійснювати довгострокові плани щодо біопалива.

(Наприклад, із 2006 р. експорт британського біодизеля до континентальної Європи зріс більш ніж на третину.) Навіть помірні податкові пільги, надані у Великій Британії, дозволяють не лише ефективно утилізувати відпрацьовані оливи й сільськогосподарські відходи, але й демонструють раціональний підхід до формування ринку біопалива за мінімальних затрат.

Отже, аналіз політики країн Європи свідчить, що вирішальними чинниками, що зумовили успішний розвиток виробництва й використання біопалива, стали:

- політична підтримка розвитку ринку;
- присутність активних учасників ринку та/чи груп, які активно лобювали початок діяльності в галузі;
- компенсація, що надавалася державою для покриття різниці в цінах на біопаливо й нафтопродукти;
- наявність ринку кінцевого споживання чистого чи сумішевого біопалива.

З огляду на досвід країн Європи, лише об'єднання зусиль на всіх рівнях дозволяє визначити ті сегменти ринку, де біопаливо здатне зайняти домінуючі позиції. Ефективність реалізації біопаливної стратегії однаково визначається всіма її складовими. Слід врахувати, що чинник успіху – не в окремому рішенні чи технології. Лише комплексний підхід веде до бажаних результатів – сприяння вирішенню екологічних та енергетичних проблем й появи українського біопалива на ринку, у тому числі світовому.

Проте не слід забувати, що чимало «друзів» нашої країни – від представників різних інститутів до радників і консультантів перших осіб – уже звикли визначати, які саме виробництва розвиватимуться на її території, і не вбачають в Україні виробника біопалива та експортера енергоносіїв, розглядаючи її лише як сировинний придаток.

Таке ставлення до нашої країни проявляється і в недопущенні на її ринок сучасних технологій, і реалізації на ньому морально застарілого устаткування, і перенесення на територію Західної України екологічно небезпечних виробництв, і запевнення в тому, що вивозити ріпак і кукурудзу значно вигідніше, ніж експортувати одержані з них біодизель і біоетанол.

Ще однією небезпечною тенденцією є спроби переконати Україну, що її енергетичну безпеку можна забезпечити лише кратним збільшенням площ під технічними культурами, хоч це може призвести до перепрофілювання земель, ерозії ґрунтів та зростання цін на сільськогосподарську продукцію. Безумовно, біоенергетичний потенціал нашої країни величезний, а переваги біопалива незаперечні. Але вони не мають бути нівельовані можливими негативними екологічними наслідками, спричиненими неправильним землекористуванням чи застосуванням застарілих технологій.

Із перших спроб проникнути на сучасний ринок рідке біопаливо для автомобілів зустріло жорстку опозицію з боку автовиробників. Вони знімали всі гарантії, якщо власник транспортного засобу збирався залити в бак не звичне паливо нафтового походження, а, наприклад, біодизель.

Але чим вище зростали ціни на «чорне золото» й міцніла занепокоєність громадськості екологічними проблемами, тим ліберальніше ставилися власники автомобільних гігантів до палива з біомаси.

До основних процесів одержання автомобільного палива з біомаси звичайно відносять:

- ферментування цукор/крохмальмістких культур (біоетанол);
- екстрагування олії з наступною переетерифікуванням (біодизель);
- піроліз деревини (піролізна олія – еквівалент дизельного палива);
- газифікацію біомаси з наступним переробленням на рідке паливо (метанол, диметилловий ефір, рідина Фішера-Тропша);
- гідротермічне перероблення (ГТП) вологої біомаси (HTU-оїл – еквівалент дизельного палива);
- анаеробне бродіння вологої біомаси (біогаз).

Лише перші два види палива з наведеного переліку виробляють сьогодні в промислових масштабах (рис. 1).

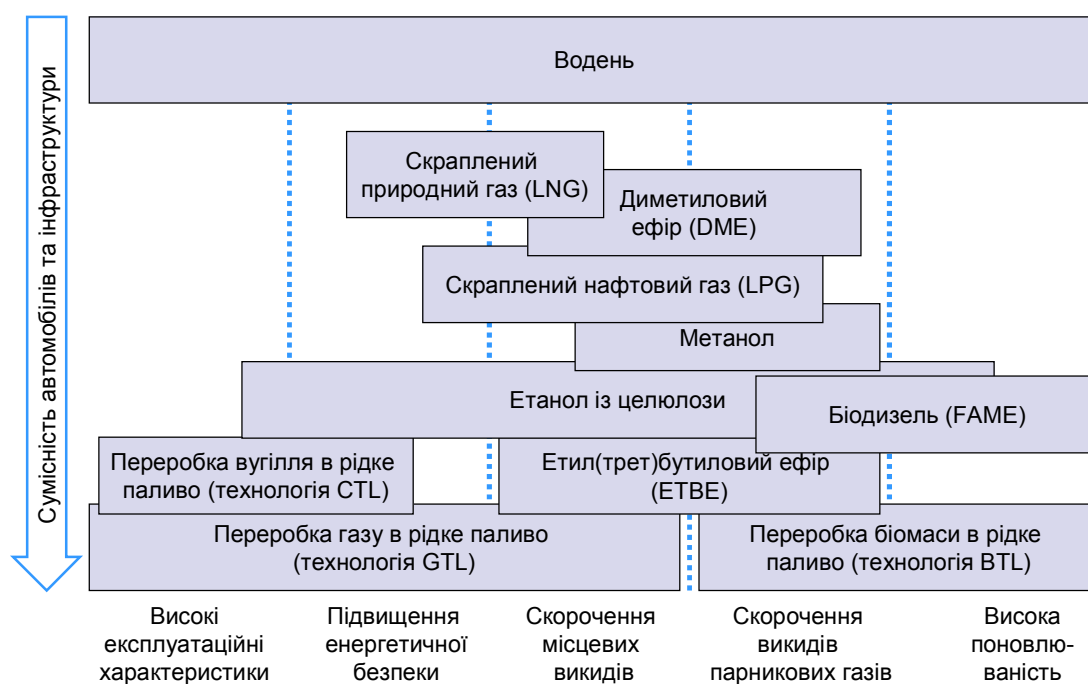


Рис. 1.1 – Основні види біопалива та їхня сумісність із сучасними автомобілями та інфраструктурою

Інші (окрім біогазу) перебувають у стадії розроблення й навряд чи стануть доступними в найближчій перспективі.

Біоетанол (й етил(трет)бутиловий ефір ЕТВЕ, одержуваний із нього), а також біодизель (переважно метилові ефіри жирних кислот FAME, зазвичай, ріпакової олії), які використовують на комерційній основі, швидше за все, залишаться домінантним нетрадиційним паливом у майбутньому.

Утім, не виключено, що й «неекономічні» види біопалива можуть істотно подешевшати і набути певної значимості (табл. 2).

Таблиця 2 – Обсяги інвестування та орієнтовна собівартість виробництва різних видів рідкого біопалива

Біопаливо	Інвестиції		Собівартість виробництва			
	€/кВт _г		€/л		€/ГДж	
	найближ- ча перс- пектива	віддалена перспек- тива	найближ- ча перс- пектива	віддалена перспек- тива	найближ- ча перс- пектива	віддалена перспек- тива
Рапсовий біодизель	150	110	0,50	0,20	15	6
Етанол (цукрові культури)	290	170	0,32...0,54		15...25	
Етанол (деревина)	350	180	0,11...0,32		5...15	
Метанол	700	530	0,14...0,20	0,10	9...13	7
ДМЕ			0,27		14	
Дизель Фішера-Тропша	720...770	500...540	0,31...0,45		9...13	
Піролізне масло (без перероблення в дизельне паливо)	1000	790	0,06...0,25		4...18	
ГТП-дизель	535	400	0,16...0,24		5...7	

У своїх директивах Євросоюз встановив план, за яким до 2010 р. частка біопалива, використовувана європейським автопарком, має досягти 5,75 % від загальної кількості спожитого автомобільного палива (табл. 3).

Таблиця 3 – У більшості країн, як розвинутих, так і таких, що розвиваються, передбачено обов'язкові квоти споживання біологічного пального

Країна	Обов'язкова квота для біологічного палива в загальному обсязі споживання, %			
	2005	2010	2015	2020
Країни ЄС	1	4	7	10
США	2	3	3	4
Індія	1	5	8	11
Китай	2	4	6	8
Бразилія	37	47	49	58
Інші	–	2	2	2

Джерело: IFPRI

Вихідною причиною, що змусила Євросоюз ввести такі жорсткі вимоги, була зросла занепокоєність громадськості екологічними проблемами (наприклад, загазованістю міст, глобальним потеплінням клімату, яке приписують інтенсивному використанню людиною викопного палива). Останніми роками до неї додався ще один важливий чинник – бажання забезпечити енергетичну незалежність країн-членів ЄС.

Саме друга причина сьогодні як ніколи актуальна для України (можливо, навіть більше, ніж для багатой Європи), оскільки основним постачальником нафти для нашої країни є Російська Федерація, яка прагне диктувати ціни на експортовані нею енергоносії.

Найгостріша проблема сьогодення, від вирішення якої залежить економічне виживання України, є стабільне забезпечення її економіки енергоресурсами. Потреба України в нафтопродуктах, за різними оцінками, становить 24...28 млн т на рік, у природному газі – 85 млрд куб. м. У перспективі очікується, що Україна забезпечуватиме свою потребу в нафті (нафтопродуктах) на 80...90% за рахунок імпорту, а в природному газі – більше як на 50 %.

Перехід на використання дво- й багатокomпонентного біопалива і відмова від традиційних нафтопродуктів зараз спостерігається в багатьох країнах світу, які ці напрями звели в ранг доктрин своїх програм енергетичної безпеки.

У результаті проведених авторами теоретичних і експериментальних досліджень отримані дані, в яких теоретичні розробки підтверджуються практичними результатами. Це дало поштовх для виникнення цілого ряду ідей, які стосуються створення комбінованих методів приготування дво- й багатокomпонентного біопалива і розробки нових технічних і технологічних засобів та методик їх розрахунку [1-141].

Зокрема, відомо, що вихід олії з 1 т ріпаку не перевищує 25...30 %. Із цієї олії можна виробити до 300...310 кг палива. Комплексне застосування механічних і гідромеханічних технологій дозволить збільшити вихід палива до 320...350 л за умов підвищення його якісних параметрів.

Отриманий в результаті кавітаційної обробки високоякісний біодизель може використовуватися в звичайних двигунах внутрішнього згорання. Можливе також використання отриманого біодизеля для приготування сумішей із звичайним дизпаливом. При цьому не потрібно вносити зміни в конструкцію двигунів автотракторного парку.

Одним із найперспективніших засобів інтенсифікації технологічних процесів приготування дво- і багатокomпонентного біопалива є гідродинамічна та ультразвукова кавітація. Механізм впливу ультразвукової енергії на рідину полягає в утворенні завдяки зусиллям розтягу у хвилі деформації кавітаційних бульбашок, які здійснюють пульсуючі коливання, що призводять до появи навколо них сильних мікротечій і локальної турбулізації середовища [15-17]. При лопанні кавітаційних бульбашок відбуваються локальні миттєві підвищення тиску до десятків тисяч атмосфер і різке підвищення температури. Спостерігаються також електричні розряди. Це призводить до активації рідини за рахунок появи в ній електричних зарядів, багатих на енергію дисоційованих та іонізованих молекул, а також атомів і вільних радикалів [20].

Монографія складається з восьми розділів, висновків і переліку посилань.

У розділі 1 проаналізовано економічні, технічні й екологічні аспекти виробництва біоетанолу.

Розділ 2 присвячено розгляду особливостей виробництва біодизельного палива з рослинної сировини, зокрема з мікрородоростей. Наведено також рекомендації щодо розвитку біопаливної галузі України.

Метою досліджень, описаних у розділі 3, було розроблення удосконаленої технології та високоефективного конкурентноздатного диспергувально-змішувального технологічного обладнання для приготування біопалива як альтернативного паливно-енергетичного ресурсу на основі узагальнення досліджень комплексного використання механічних і гідромеханічних методів, зокрема, диспергування та гомогенізації..

У розділі 4 розглянуто ефективні технічні засоби для виробництва олії, зокрема, гвинтові малотоннажні, великотоннажні та інтегровані олійні преси. Також досліджено ефективні технічні засоби для реалізації процесу очищення олії від фосфатидів, механічних та інших небажаних домішок.

У розділі 5 наведено опис експериментального гідродинамічного стенду для досліджень гідродинамічних характеристик кавітаторів в обмежених потоках на режимах штучної кавітації, результати експериментальних досліджень кавітаторів у вигляді дисків і конусів із різним діаметром основи й кутом розкриття при його вершині, проаналізовано динаміку вносу газу з вентильованих каверн, а також описано особливості ежекції на режимах штучної кавітації й кавітаційного опору на режимах розвиненої кавітації.

У розділі 6 наведено огляд конструкцій кавітаційних апаратів, призначених для інтенсифікації технологічних процесів.

У розділі 7 проаналізовано аспекти удосконалення базових технологічних засад виробництва паливних сумішей на основі ріпакової олії з використанням гідродинамічної кавітації. Зокрема, висвітлено питання, пов'язані з особливостями світової практики використання ріпакової олії для виробництва біопалива, описано існуючі технологічні засади виробництва біодизельного палива кавітаційними методами й напрями їх удосконалення, а також проаналізовано технічні й технологічні кавітаційні засоби компанії «БіоСам».

У розділі 8 досліджено питання, пов'язані з ефективністю виробництва біодизельного палива з використанням низькочастотного ультразвуку, зокрема проаналізовано процес ультразвукової переетерифікації. Розглянуто економічні та екологічні переваги цього процесу, наведено методику розрахунку низькочастотного ультразвукового кавітаційного апарата з циліндричною проточною камерою.

1 ЕКОНОМІЧНІ, ТЕХНІЧНІ Й ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

Перші спроби використати спирт як паливо припадають на 1890-і – дитячі роки автомобілізму. «Справжнім дивом» називали паризькі газети початку ХХ ст. автобуси, що працювали на електриці – суміші спирту з бензолом. Отож німецький монополін та угорська моталка, шведський лет-тбентил та англійська дисколь, бразильська азуліна й радянська «казанська суміш», що з'явилися невдовзі, були далеко не випадковими гостями на паливному ринку. Утім, це не завадило їм опинитися на смітнику історії, де вони перебували до 1974-го, коли нафтові ціни, що підскочили втричі, змусили знову згадати про біоетанол і суміші на його основі.

1.1 Що таке біоетанол?

Біоетанол – це звичайний етиловий (винний) спирт, отримуваний під час перероблення рослинної сировини, головним чином заради використання його як палива. У Законі України від 23.02.06 № 3502-IV біоетанолом названо «спирт етиловий зневоднений, вироблений із біологічно поновлюваної сировини».

Відомий із давнини спосіб отримання біоетанолу – спиртове бродіння продуктів, що містять вуглеводи (виноград, плоди й т. п.) під впливом ферментів дріжджів і бактерій. Також переробляють крохмаль, картоплю, рис, кукурудзу, інші культури, останнім часом – рослинні відходи сільськогосподарства, що містять цукор чи крохмаль (біоетанол другого покоління). Реакція одержання етанолу є досить складною, проте її схему можна зобразити узагальненим рівнянням:



Унаслідок бродіння утворюється розчин, що містить приблизно 15 % етанолу, позаяк у більш концентрованих розчинах дріжджі зазвичай гинуть. Отриманий в такий спосіб етанол вимагає очищення й концентрування.

1.2 Переваги й недоліки біоетанолу

Переваги біоетанолу оцінили ще 1908 р., коли Генрі Форд випустив свою знамениту «Модель Т», двигун якої працював на етанолі. Окрім високого октанового числа (106...108 одиниць за дослідницьким методом), яке дозволяє підвищити ступінь стиску в камері згоряння до 12...14 і скоротити питомі затрати енергії на одиницю потужності (тобто підвищити ККД двигуна), спиртове паливо:

– зменшує утворення нагару і знижує кількість шкідливих речовин у

двигуні автомобіля, зберігаючи двигун чистим і забезпечуючи його оптимальну роботу;

– є поновлюваним ресурсом і практично нейтральний як джерело парникових газів. Під час отримання й наступного згоряння біоетанолу виділяється стільки ж CO_2 , скільки було вилучено з атмосфери використаними для його виробництва рослинами. У 2006 р. застосування етанолу в США дозволило скоротити викиди парникових газів на 8 млн т (у CO_2 -еквіваленті), що дорівнює річному вихлопу 1,21 млн автомобілів;

– знижує токсичність вихлопу на 21 %; присутній в етанолі кисень дозволяє повніше спалювати вуглеводні палива; 10 % етанолу в бензині дозволяють скоротити викиди твердих частинок на 50, CO – на 30 %. За наявного виробництва спиртового палива це еквівалентно зникненню з дороги 1 млн автомобілів щорічно.

Американська пульмонологічна асоціація стверджує, що з 1990 р. застосування спиртобензинових сумішей дозволило на чверть зменшити викиди, що утворюють смог;

– є біологічно розкладаваним й не забруднює природні водні системи.

У 2005 р. почали з'являтися дослідження, в яких стверджувалося, що біоетанол має негативний енергетичний баланс. Тобто під час виробництва етанолу витрачається більше енергії, ніж її можна з одержати з біоетанолу. Однак у 2006 р. у своєму звіті міністерство сільського господарства США (USDA) повідомило, що етанол, вироблений із кукурудзи, має паливний баланс 1,24.

Тобто з етанолу можна одержати на 24 % більше енергії, ніж витрачено під час його виробництва (до речі, згідно з тим-таки дослідженням під час спалювання високооктанового бензину виділяється на 15 % менше енергії, ніж потрібно для його виробництва).

Паливний баланс етанолу, виробленого з целюлози, дорівнює 2, а одержуваного з цукрової тростини (за умови використання багаси як палива на ТЕС) досягає 8.

Безумовно, етанол має і свої недоліки. Це, зокрема:

– нижча, ніж у вуглеводневих видів палива теплота згоряння (25 МДж/кг проти 42 у бензині);

– менша енергоємність (в 1 л етанолу міститься на 37 % менше енергії, ніж у 1 л бензину), яка обумовлює більшу питому витрату спиртового палива;

– низький тиск насичених парів і висока температура випаровування, що ускладнює запуск двигуна за низьких температур;

– висока корозійна активність, що посилюється в присутності води;

– наявність токсичних альдегідів у вихлопних газах, що робить далеко не безперечними висновки щодо цілковитої екологічної безпеки спирту як палива (табл. 1.1).

Через наявність цих недоліків біоетанол, зазвичай, використовують не в чистому вигляді, а у вигляді добавок до вуглеводневого палива, вирішу-

ючи при цьому завдання покращання експлуатаційних властивостей останніх – з одного боку, та економії нафтових ресурсів – з іншого.

Таблиця 1.1 – Сумарні викиди від застосування спиртового палива E85 і бензину марки Premium (A-95-Євро)

Сполука	Сумарні викиди (well-to-wheel) для автомобілів малої вантажопідйомності, г/км	
	для преміального бензину	для палива E85
Емісійні гази		
Угарний газ	0,86	0,83
Оксиди азоту	0,14	0,06
Бенз(а)пірен	0,0002	0
Парникові гази		
Вуглекислий газ	258,0	24,0*
Метан	0,014	0,028
Альдегіди		
Ацетальдегід	0,0002	0,0088
Формальдегід	0,0008	0,0014

* З урахуванням витрат вуглекислого газу на фотосинтез рослин

Джерело: DOE

1.3 Технології одержання етанолу

Сучасна промислова технологія отримання етилового спирту з харчової сировини складається з таких стадій:

– підготовки й подрібнення цукро- чи крохмальовмісної сировини – зерна (зазвичай, жита чи пшениці), кукурудзи, картоплі, топінамбура, інших культур, а також рослинних відходів сільського господарства;

– ферментування – розщеплення крохмалю до спирту під впливом дріжджових ферментів. З цією метою застосовують рекомбінантні препарати альфа-амілази, отримані біоінженерним шляхом – глюкамілаза, амیلосубтилін;

– ректифікування браги (розділення, засноване на різних температурах кипіння її компонентів), здійснюване, зазвичай, у колонних апаратах із контактними елементами у вигляді тарілок.

Технологія паливного біоетанолу схожа з одержанням звичайного харчового спирту, однак має ряд особливостей. На відміну від виробництва харчового спирту, де застосовують переважно "сухий" спосіб виробництва (рис. 1.1), у технології біоетанолу використовують "мокрый" спосіб (рис. 1.2). У "мокрому" процесі спочатку виділяють глютен і крохмаль, який потім спрямовують на виробництво етанолу, у "сухому" глютен не виділяють.

Для виробництва біоетанолу, зазвичай, достатньо двох ректифікаційних колон, тоді як на заводі харчового спирту таких колон п'ять.

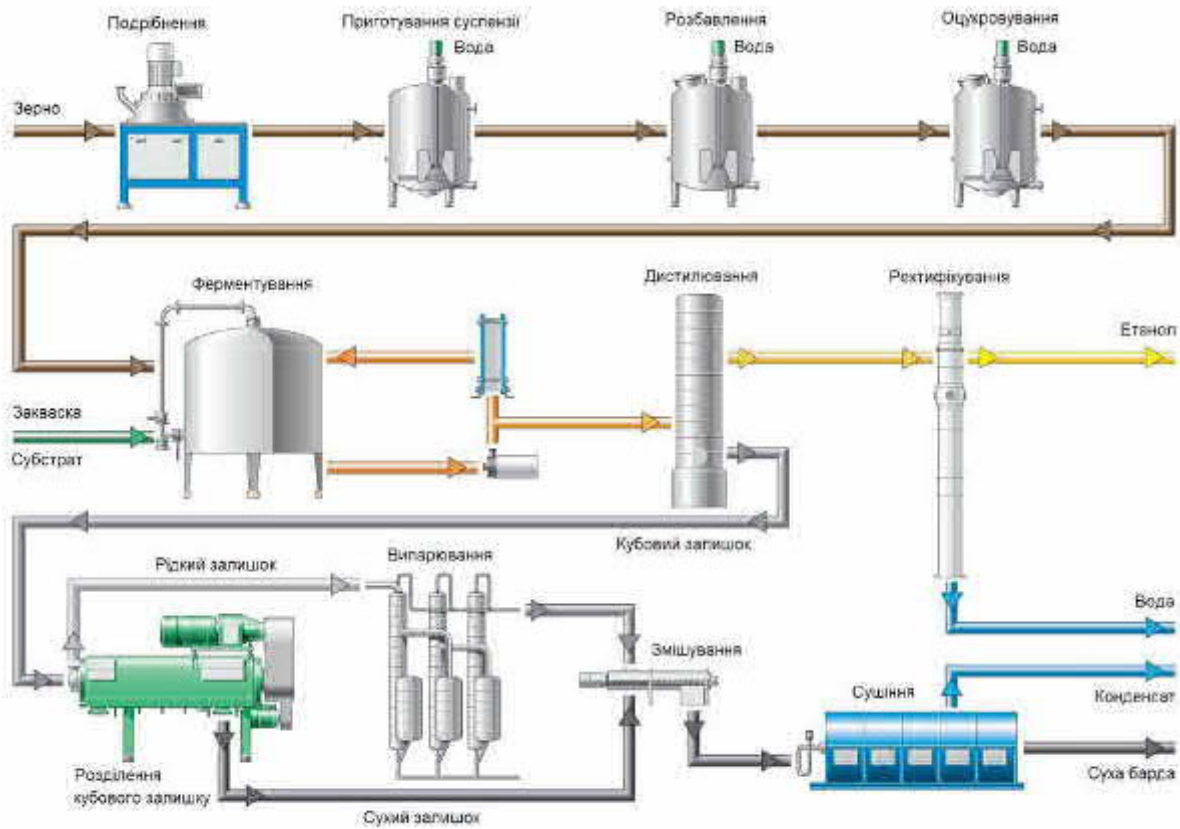


Рис. 1.1 – “Сухий” спосіб одержання етанолу (виробництво харчового етанолу)

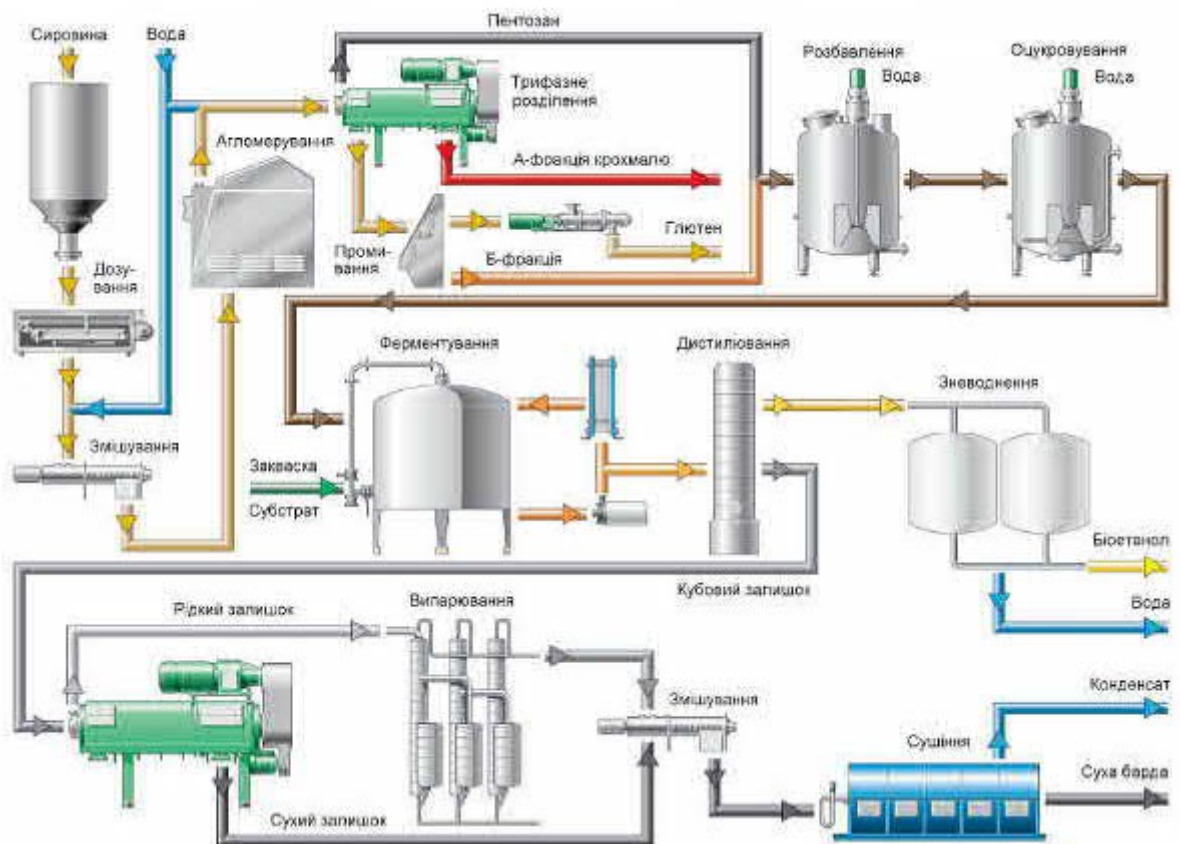


Рис. 1.2 – “Мокрий” спосіб одержання етанолу (виробництво біоетанолу)

Паливний біоетанол, на відміну від харчового спирту, можна одержувати з целюлози та рослинних відходів сільського господарства. Одержання паливного біоетанолу вимагає додаткового зневоднення продукту, оскільки внаслідок присутності 4 % води в дистиляті відбуватиметься розширення спирто-бензинової суміші.

Зазвичай, зневоднення біоетанолу здійснюють на молекулярних ситах – мікропористих тілах, що вибірково поглинають речовини, молекули яких менші, ніж розміри мікропор.

Процес зневоднення на молекулярних ситах відбувається таким чином: парова фаза (що складається з води та етанолу) надходить в міжтрубний простір апарата зневоднення; водяна пара (молекули якої менше пір селективної мембрани) проходить крізь керамічну трубку з цеолітовим напленням і захоплюється вакуумним насосом, а пара етанолу (молекули якого більше, ніж пори сита) виходить з апарата і прямує до конденсатора зневодненого етанолу.

Рушійною силою проникнення в цьому разі є різниця тисків у трубному (створюється вакуумним насосом) і міжтрубному просторі (створюється грійною парою випарного апарату і конденсатором зневодненого етанолу).

Недоліками процесу зневоднення на молекулярних ситах є необхідність періодичної високотемпературної регенерації та обов'язкового вакуумування апаратів, що мають значні габарити (до 9 м заввишки).

Обґрунтування можливості застосування первапорації

Вищезазначених недоліків можна уникнути, якщо використати замість зневоднення на молекулярних ситах первапорацію. Первапорація – процес мембранного розділення, який об'єднує розчинення й молекулярну дифузію летких компонентів системи в селективній непористій мембрані з їхнім випаровуванням на протилежному боці цієї мембрани.

Первапораційне розділення ґрунтується на різній дифузійній проникності мембрани для компонентів суміші і розглядається як послідовність розчинення речовини в поверхневому шарі мембрани, дифузії молекул речовини крізь мембрану й виділення пари цієї речовини на зворотному боці мембрани.

Установлено, що первапорація потребуватиме менших капіталовкладень порівняно зі зневодненням на молекулярних ситах, тому що:

- первапораційна технологія є екологічно чистою, оскільки не потребує допоміжних речовин і реагентів;
- температура процесу становить 60...80 °С, що надає можливість використовувати теплоту низького потенціалу;
- застосовувані непористі мембрани не потребують регенерації;
- висока селективність дає змогу здійснювати розділення за цикл;
- простота, компактність і модульна конструкція первапораційних установок дають можливість легко адаптувати їх до існуючих обсягів виробництва.

Дослідження дозволили встановити, що найприйнятнішою для реалізації процесу вбачається гідрофільна первапораційна композиційна мембрана Владіпор, яка являє собою непористий полімерний плівковий матеріал на основі фторопласту Ф42Л на підкладці з лавсану з роздільним шаром завтовшки 10 мкм і, окрім високих показників селективності й проникності, витримує безпосередній контакт з органічними розчинниками (зокрема, чистим етанолом) за умови підвищених температур (до 100 °С).

У разі використання таких мембран площа поверхні мембранних елементів, потрібна для виробництва 17,5 дал/добу паливного біоетанолу при 313 К і 0,1 МПа становить близько 70 м². Об'ємна продуктивність відповідного апарата за вихідною сумішшю сягатиме 100 дал/добу, а його габаритні розміри не перевищуватимуть 2,3×1,5×0,8 м, тобто будуть втричі меншими, ніж розміри апарата для реалізації процесу зневоднення етанолу на молекулярних ситах.

Середня собівартість виробництва біоетанолу "мокрим" способом у Німеччині, за даними Institut fur Weltwirtschaft Kiel (ФРН), у липні 2007 р. становила в середньому для країн ЄС €0,85/л (в Україні, за підрахунками Інституту цукрового буряка УААН, - €0,67/л) (рис. 1.3).

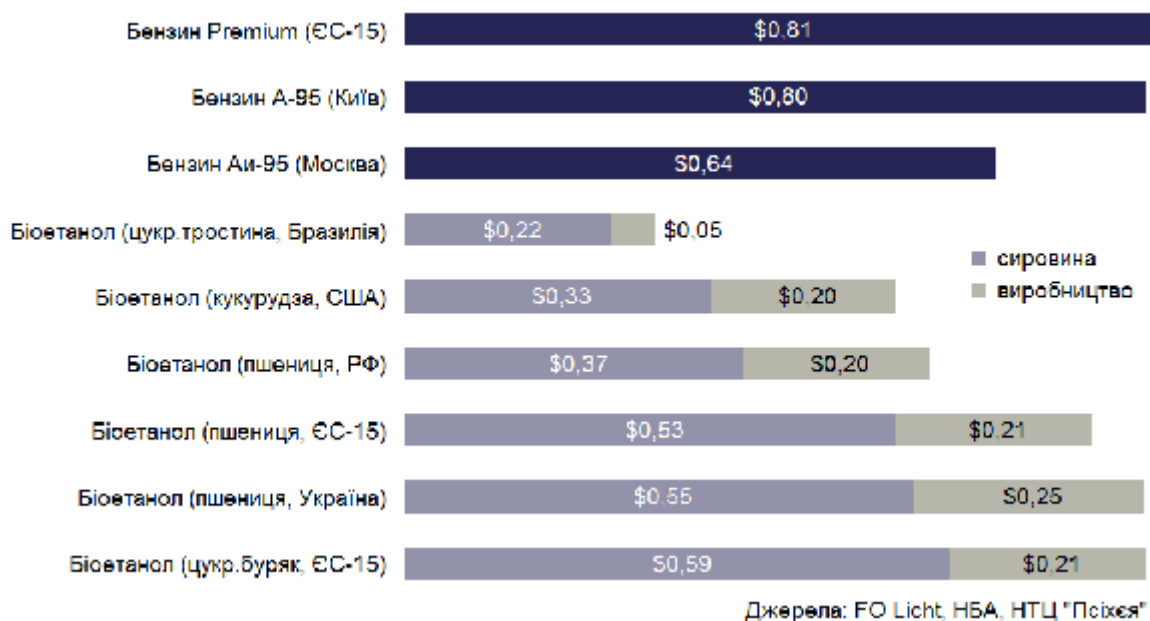


Рис. 1.3 – У 2008 р. собівартість літра етанолу й бензину (без податків) в Україні та ЄС були приблизно рівними

1.4 Сировина для одержання етанолу

Сьогодні більшу частку біоетанолу виробляють із кукурудзи (США) і цукрової тростини (Бразилія), хоча сировиною для його одержання можуть бути будь-які сільськогосподарські культури з великим змістом крохмалю чи цукру: рис, сорго, ячмінь, картопля, цукрові буряки, батат. Великий потенціал має маниока, яку у великій кількості виробляють Китай, Нігерія, Таїланд.

Собівартість виробництва біоетанолу з маніоки в Таїланді становить близько \$35/барр. нафтового еквівалента. Найкращим кліматом для вирощування цукрової тростини має Перу, країни Карибського басейну. Цукрову тростину можуть також вирощувати Індонезія, деякі з африканських країн, наприклад, Мозамбік.

Багато етанолу можна виробляти і з целюлози. Сировиною можуть бути різні відходи сільського й лісового господарства: пшенична й рисова солома, багаса цукрової тростини, деревна тирса тощо. Але поки що виробництво паливного етанолу із целюлози коштує дорожче, ніж його отримання з харчових сільськогосподарських культур (див. рис. 1.4).

Оскільки на вартість сировини припадає до 70...80 % собівартості етанолу, головним критерієм її вибору є доступність і наявність для перероблення протягом усього року. При цьому кожен вид сировини має свої переваги й недоліки.

Бульбові культури (картопля, топінамбур) дають мінімальний вихід етанолу (до 150 л/т), хоча зазначений недолік багато в чому компенсує їхня висока врожайність (до 3 тис. т/км²). Попри це вважають, що навіть у місцях їхнього найкращого вирощування бульбові можна використовувати лише як додаткову сировину через трудомістке збирання, яке практично неможливо механізувати; обмежений термін зберігання, який не охоплює весь період роботи спиртових заводів; невисоку цінність додаткових продуктів внаслідок низького вмісту в них протеїну; низьку ліквідність і високий (порівняно із зерновими) попит на бульбові культури.

Найбільш затребуваними для виробництва біоетанолу зерновими культурами є (рис. 1.4):

- кукурудза (410 л/т) – найпоширеніша крохмальна сировина, що є ідеальною там, де її легко вирощувати;

- пшениця (375 л/т) – дещо поступається кукурудзі за затребуваністю через різний вміст крохмалю в різних сортах і високу в'язкість, зумовлену присутністю в її складі пентозанів. З іншого боку, під час виробництва біоетанолу з пшениці, зазвичай, необхідні хімічні піногасники й додаткові ферменти для зброджування;

- тритикале (гібрид жита і пшениці) – має підвищену морозостійкість (більшу, ніж в озимій пшениці) й високу стійкість до грибних і вірусних хвороб. Культура є менш вимогливою до родючості ґрунтів і містить багато білку в зерні, проте як сировина для одержання біоетанолу має усі вади пшениці;

- ячмінь (330 л/т) – дешевий, однак має меншу врожайність, ніж в інших зернових. При цьому є дуже абразивним, потребує спеціальних ферментів для зброджування (бета-глюканази), а також використання піногасника;

- жито (357 л/т) – є недорогою сировиною, хоч і з меншою, ніж у пшениці, урожайністю. Для зброджування потребує додаткових ферментів (ксиланази) та застосування піногасника.

Останніми роками в усьому світі серйозну увагу приділяють питанням отримання етанолу з рослинної сировини (фітомаси) – деревини, а також сільськогосподарських рослин та їхніх відходів. Щороку на планеті утворюється близько 200 млрд т рослинної біомаси, що містить целюлозу.

За орієнтовними оцінками, світові запаси деревини на планеті приблизно дорівнюють розвіданим запасам нафти, проте останні виснажуються, тоді як запаси деревини збільшуються внаслідок природного приросту.

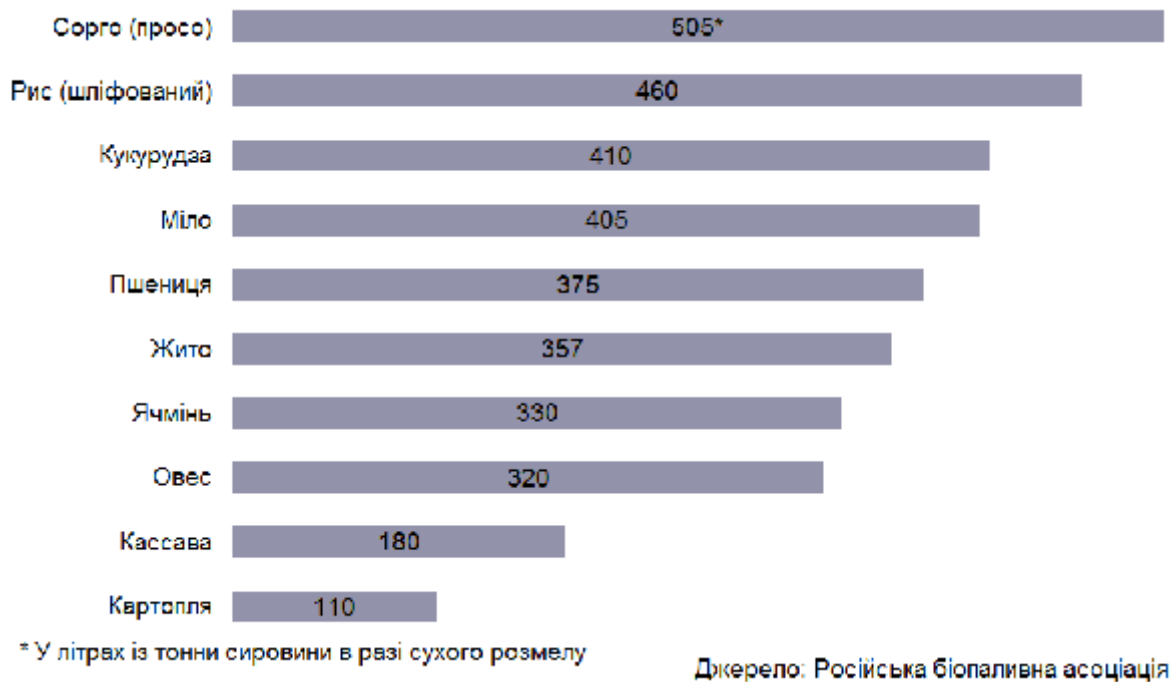


Рис. 1.5 – За умови 90-відсоткової конверсії крохмалю найбільше етанолу можна одержати з тонни рису й проса

З іншого боку, сьогодні є доступною велика кількість целюлозного матеріалу; целюлозна сировина є набагато дешевшою, ніж традиційна; часто целюлоза взагалі не має економічної цінності, оскільки є відходом (солома); целюлозні матеріали не використовують для виробництва харчових продуктів, тому відсутня конкуренція щодо напрямків застосування сировини.

Основою одержання гідролізного біоетанолу є реакція розщеплення глікозидних зв'язків полісахаридів целюлози (деревина, солома) з утворенням як основних продуктів реакції моносахаридів (суміші пентоз і гексоз), які потім піддають спиртовому зброджуванню.

При цьому слід підкреслити, що целюлоза є матеріалом, важким для конвертування. Поки що вартість гідролізного виробництва висока, і не в змозі конкурувати з традиційними способами одержання біоетанолу.

1.5 Планування і будівництво виробництв паливного біоетанолу

Обсяги капітальних вкладень під час будівництва біоетанольного заводу багато в чому визначаються видом сировини, що планують перероб-

ляти. Вартість заводу становить від \$0,50 до \$1,00 за літр потужності за біоетанолом.

Для країн-членів ЄС у короткостроковій перспективі інвестиції у виробництво етанолу з цукровмісних культур оцінюють величиною EUR290/кВт для підприємства річною потужністю 200 млн л етанолу. Використання як сировини деревних матеріалів вимагатиме EUR350/кВт для підприємства тієї ж потужності.

У віддаленій перспективі собівартість виробництва впаде на 50 % для деревної і на 40 % для цукровмісної сировини, хоча ефективність виробництва в останньому випадку не зросте. Проте незалежно від обсягів вкладень єдиним способом отримати добре працюючий завод є ретельне й детальне планування ще до початку його будівництва. При цьому необхідно:

- змодельювати розвиток ринку, зважаючи не лише на оптимістичні тенденції збільшення попиту на біопаливо, але й, наприклад, на можливість чергового обвалу цін на нафтопродукти;

- розглянути можливість інтегрування заводу в уже існуючі індустріальні комплекси. Зокрема, для компаній, які сьогодні серйозно цікавляться виробництвом біопалива, має сенс спільне розташування заводів із виробництва біоетанолу й біодизеля на одному майданчику. Це дозволяє: врахувати особливості сівозміни (пшеницю, зазвичай, чергують із ріпаком); забезпечити гнучкість використання сировини; скоротити бюрократичну тяганину під час оформлення дозволів на виробництво; скоротити експлуатаційні витрати;

- зважити переваги й недоліки різних варіантів розташування заводу. При цьому вибір майданчика, зазвичай, визначається: наявністю ділянки землі площею 4...8 га (із буферною зоною); можливістю отримання дозволів на будівництво; доступом до дешевої сировини протягом усього періоду роботи заводу (до 80 % собівартості біоетанолу – це вартість сировини).

Важливе значення має також наявність автомобільної дороги й залізниці, здатних забезпечити мінімальні транспортні затрати й зручність відвантаження продукції споживачеві; наявність води, електроенергії, робочої сили.

Зокрема, завод річною потужністю 151 млн л біоетанолу (42 тис. дал/добу), який працює за «сухим» способом переробки кукурудзи, займає 10...16 га (приблизно 200×500 м). Витрати: електроенергія – 0,3 кВт · год/л; енергія – 10 МДж/л; вода – 3 л/л. Для рейкового кільця для залізничного потяга на 100 вагонів необхідно 60...70 га;

- передбачити забезпечення технологічної гнучкості заводу. Біоетанол – досі молодий продукт, що має досягти зрілості. Тому вимоги щодо нього будуть істотно змінюватися переважно через проблеми, що пов'язані з особливостями його застосування на транспорті. До того ж споживач (наприклад, компанія, що займається компаундуванням палива) може висунути додаткові вимоги, які відрізняються від встановлених нормативними документами.

Забезпечення 25 %-го запасу продуктивності для фільтрів, сепараторів,

теплообмінників та іншого простого обладнання, що не пов'язане зі значними затратами, здатне забезпечити достатній запас гнучкості виробництва (як у разі змінення вимог до біоетанолу, так і під час вирішення виробничих проблем, що виникатимуть);

– отримати реальні зобов'язання від основних потенційних клієнтів. Слід пам'ятати, що довгострокові контракти на основні продукти можуть забезпечити більш суттєву норму прибутку;

– проаналізувати можливості попереднього оброблення сировини, уважно ставитися до вибору ферментів, піногасників, проблем забезпечення безпеки праці та екологічної безпеки виробництва;

– здійснити детальне дослідження кон'юнктури ринку щодо всіх одержуваних продуктів: не лише самого біоетанолу, а й додаткових продуктів. Продаж останніх – спосіб збільшити прибутковість заводу. За «мокрого» способу виробництва – це корми для тварин і глютен (пшенична клейковина, якщо сировина – пшениця). За «сухого» – суха барда (у західній термінології – DDGS) – залишок після ферментації (оболонки зерна, дріжджі, протеїн (глютен, клейковина) у висушеному вигляді або у вигляді концентрованої суспензії), який використовують як корм для тварин із вмістом протеїну 25...35 %.

У середньому з однієї тонни сировини утворюється від 300 (кукурудза) до 430 кг (ячмінь) сухої барди. DDGS можна згодовувати великій рогатій худобі до 100 % раціону, свиням і птахам – до 20 % раціону. Працюючий за «сухою» схемою завод річною потужністю 150 млн л етанолу (сировину – кукурудза) може забезпечити кормами 70 тис. голів великої рогатої худоби.

Оскільки на сушіння DDGS витрачається до 30 % енергії всього заводу, без продажу цього продукту завод, зазвичай, є неприбутковим. При цьому вартість DDGS визначається вартістю протеїну, що міститься у ньому.

1.6 Обсяги виробництва паливного етанолу

Виробництво паливного етанолу із зернових культур постійно зростає (проте не встигає за зростанням попиту на нього – рис. 1.5). У 2007 р. воно перевищило 47 млрд л, з яких 38 % припало на Бразилію і 36 % – на США. Етанол у США виробляють із кукурудзи, у Бразилії – із цукрової тростини (що вигідніше). Хоча американський уряд надав виробникам податковий кредит (не субсидії) до \$0,51 за галон етанолу, бразильський продукт є набагато дешевшим через низьку заробітну плату збирачів цукрової тростини.

Найбільшими виробниками біоетанолу в США є компанії Archer Daniels Midland і Cargill. За даними Асоціації поновлюваних видів палива (RFA), близько ста американських заводів із виробництва спирту виробляють більше 17 млрд л/рік. У RFA розраховують, що 18 додаткових заводів, споруджуваних у США, додадуть близько 3,4 млрд л до річного виробництва. Якщо ця тенденція продовжиться, то в 2012 р. виробництво паливного етанолу сягне 30 млрд л.

Принаймні, прийняті в серпні 2005 р. Енергетичний біллз (Energy Policy Act of 2005) і Стандарт поновлюваного палива (Renewable Fuels Standard) передбачають нарощувати виробництво етанолу із зернових культур на 3,0, а з целюлози (стебла кукурудзи, рисова солома, відходи лісової промисловості) – на 3,8 млрд л щорічно.

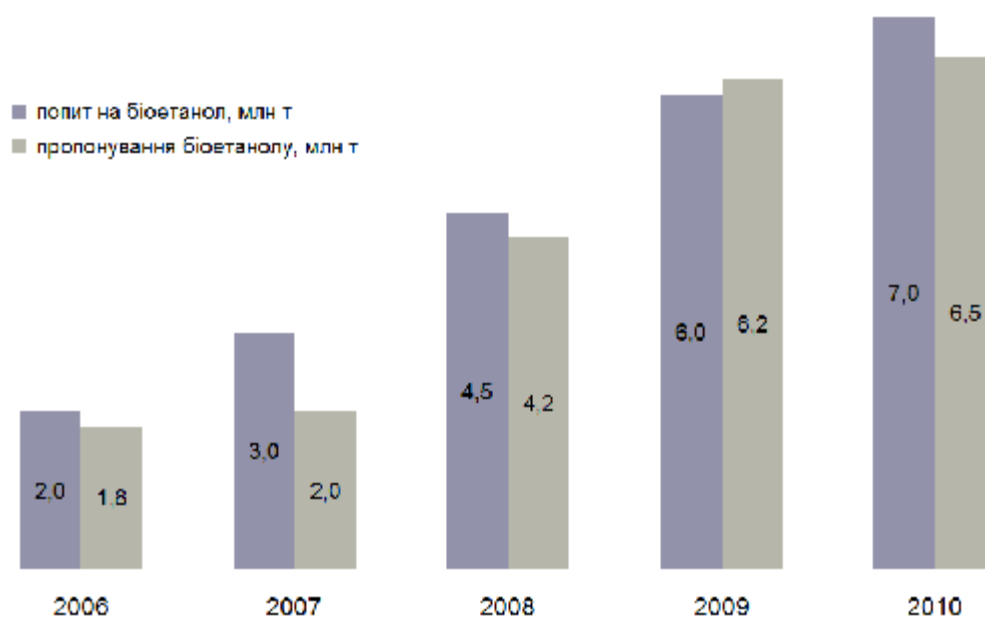


Рис. 1.5 – Згідно з прогнозом Shell попит на паливний етанол у ЄС-15 і в 2010 р. буде випереджати пропонування

У країнах ЄС біоетанол виробляють близько 50 заводів проектною потужністю понад 5 млрд л на рік (табл. 1.5); усього в світі таких заводів 572, а їхня загальна потужність – 80,27 млн т/рік; дані на 01.03.09). До 2010 р. Планується досягти показника 11 млрд л (у 2008 р. – 8 млрд).

Таблиця 1.5 – Біоетанольні заводи Європи

Країна	Компанія-власник	Потужність, млн л/рік	Статус
Австрія	Agrana	190	працює
Бельгія	Alcogroup, Boerenbund	300	проект
	Tirlemontoise, Sudzucker AG	270	проект
Велика Британія	Wessex Grain	125	будується
	British Sugar	62,5	будується
Данія	Elsam, Fynsvaerket	127	проект
Іспанія	Bioetanol Galicia	176	працює
	Ecocarburantes Espanoles	200	працює
	Abengoa	200	будується
	Abengoa Bioenergy, Ebro Puelva	200	проект
	Abengoa Bioenergy, Azuvarera	125	проект
	Abengoa, EVE	126	проект
	SNIACE, Cantabria Capital	125	проект
Італія	Alcoplus	42	працює
	Italia Zuccheri	40	проект
	Italia Zuccheri	40	проект

Продовження табл. 1.5

Країна	Компанія-власник	Потужність, млн л/рік	Статус
Латвія	Jaunpagastas	8	будується
Литва	Stumbras	25	працює
Нідерланди	Royal Nedalco	14	працює
	Blue Ocean Associates	110	проект
	Bioethanol Rotterdam (BER)	110	проект
	Royal Nedalco	220	проект
Польща	Cargill	15	працює
	Akwawit SA	100	працює
	Polskie Mlyny	140	проект
Словаччина	Slovnafta MOL	75	проект
Словенія	Ormoz Sugar Factory	55	проект
Угорщина	Gybr Distillery	16	працює
	Hungrana	30	працює
	CSLM / Bio-Tech Energie	126	проект
	United Biofuels Holdings Europe AG	100	проект
	Bio-Tech Energie et al.	430	проект
Фінляндія	Lannen Tehtaat	83,5	проект
Франція	Tereos	40	працює
	Tereos	40	працює
	Tereos	48	працює
	SLS	50	працює
	Cristal Union	150	працює
	Tereos	300	будується
	Lacq	125	проект
	Cristal Union	280	проект
	Roquette	200	проект
	Tereos	300	проект
ФРН	KWST	20	працює
	Sasol	76	працює
	Mitteldeutsche Bioenergie (MBE)	100	працює
	Nordbrandenburger Bioenergie (NBE)	220	працює
	Siidzucker Bioethanol AG	260	працює
	NAWARO Chemie GmbH	100	проект
	Nordzucker AG	130	проект
Чехія	Jihocesky zemeledelsky	40	проект
	Cukrovari TDD AS / Agroetanol TDD	55	проект
	SWP Trading	40	проект
	Biopal	40	проект
	Aliachem	40	проект
	ADW Bio	40	проект
	Dechtochema Bituman	25	проект
Швеція	Agroetanol AB	50	працює
	SEKAB	65	працює
	Lantmannen	150	проект

Джерело: F.O.Ucht's World Ethanol and Biofuels Report

Азійські держави, якими в 2004 р. було вироблено лише 500 млн л паливного етанолу, у 2008 р. випустили майже 5 млрд л.

Виробництво біоетанолу в Україні організовано в 1998 р. на підприємствах державного концерну «Укрспирт». У 1998-2006 рр. ними було випущено близько 50 тис. т біоетанолу (див. табл. 1.6). Нині достовірні дані щодо обсягів виробництва спиртового палива в Україні відсутні.

Таблиця 1.6 – Перспективи виробництва біоетанолу в Україні

Культура	Максимальна площа вирощування, тис. км ²	Планується виділити на паливні цілі, тис. км ²	Максимальна врожайність, тис. т/км ²	Виробництво біоетанолу, тис. т/рік	Можлива економія, т.у.п./рік	Скорочення викидів CO ₂ , тис. т/рік
Цукровий буряк	18,2	2,73	5,0	986	915	3074
Кукурудза	21,2	6,37	0,6	1097	1019	3422
Картопля	19,0	1,90	3,0	553	514	1727
Деревина				12	8	39
Разом	58,4	11,00	8,6	2648	2456	8262

* В Україні не використовують понад 20 % ріллі

Джерело: ІПЕ НАН України

1.7 Застосування етанолу як палива

Піонером використання етанолу як моторного палива став засновник автомобільної промисловості США Генрі Форд, який не тільки побудував перший транспортний засіб, що працював на спирті, але й заклав кілька заводів із виробництва етанолу. Проте невдовзі нафтова промисловість, що розвивалася семимильними кроками, практично цілком витиснула спирт із паливних баків автомобілів.

Питання використання етанолу як палива був знову підняте в 1970-х, коли Організація країн-експортерів нафти (ОПЕК) обмежила поставки «чорного золота» до США й ряду країн Європи. Щоб швидше вийти з кризи, яка виникла внаслідок цього, у США та Європі було прийнято закони, що стимулювали виробництво й застосування сумішевих видів палива.

Першими ластівками стали суміші 10...20 % етанолу з бензином, що отримали назву «газохоли» (від англ. gasohol = gasoline + alcohol – бензиноспирт). Такі суміші за більшістю показників відповідали нафтовому паливу й не вимагали модифікування чи додаткового регулювання існуючих карбюраторних двигунів.

Добавки етанолу до бензину сприяли підвищенню октанового числа палива на 5...8 одиниць, поліпшенню його згоряння, а також зниженню токсичності відпрацьованих газів. При цьому зростали також ефективний коефіцієнт корисної дії двигуна та його потужність (хоча зменшувалася економічність).

Поширенню газохолів заважала низька стабільність спиртобензинових

сумішей. Потрапляння навіть незначного обсягу води в цей продукт призводила до її розшаровування, причому схильність щодо неї зростала зі зниженням температури. Це, звичайно, є несуттєвим, наприклад, для Бразилії, але для Європи та України, зокрема, було серйозною проблемою.

Суттєвому зростанню ринку сприяло розроблення в 1990-х палива E85 – суміші 85 % етанолу з 15 % нафтового бензину. Запропоноване General Motors паливо, октанове число змішування якого перевищувало 100 одиниць, мало великий «компресорний» ефект, сприяючи підвищенню потужності й крутного моменту.

Невипадково гоночні автомобілі здавна працювали на спиртових сумішах. З іншого боку, E85 виявилось набагато екологічнішим, аніж бензин, завдяки меншій токсичності викидів і зниженню парникового ефекту.

Як результат реалізації проекту було створено ринок E85 і парк автомашин, здатних працювати як на бензині, так і на «вісімдесят п'ятому» (виконання Flexifuel = FFV – flexible fuel vehicle; табл. 1.6). Серед сучасних «спиртовиків» – усі повногабаритні «господарники» від General Motors, більшість Ford Focus, мінівени Chrysler тощо.

Таблиця 1.6 – Автомобілі, двигуни яких (у виконанні FFV) адаптовано до застосування палива E85

Виробник	Марка автомобіля
Chevrolet	Astra, Avalanche, Corsa, Impala, Meriva, Montana, Monte Carlo, Silverado, Suburban, Tahoe, Zafira
Chrysler	Sebring Sedan
Citroen	C3
Dodge	Caravan, Cargo Minivans, Durango, Grand Caravan, Ram Pickup, Stratus Sedan
Fiat	Mille, Palio, Siena
Ford	Crown Victoria, Explorer, F-150, Fiesta, Focus, Focus C-MAX, Grand Marquis, Ranger, Sport Track XLT, Taurus
GMC	Sierra, Yukon, Yukon XL
Mazda	B3000
Nissan	Titan
Peugeot	206
Renault	Clio, Scénic
Saab	9-5
Volkswagen	Golf City, Fox, Kombi
Volvo	S40, V50

Окрім приватних автомобілів, сумішню E85 у межах спеціальних програм заправляють муніципальний транспорт – вантажівки, автобуси, фургони й таксі. При цьому ціна літра E85 на заправках відповідає ціні літра бензину Midgrade (в Європі – Regular, аналог А-92).

Нині всі провідні виробники гарантують нормальну роботу карбюраторних двигунів при додаванні до 10 % етанолу – без модифікації паливної системи, а в разі застосування E85 – за незначних змін, які не впливають на загальну вартість автомобіля.

Спиртовий апгрейд звичайних автомашин коштує близько EUR300 і полягає в установці автоматичної системи регулювання складу паливно-повітряної суміші, каталітичних нейтралізаторів альдегідів, що наявні у вихлопних газах, заміні ущільнень на стійкі до спирту тощо. За наявності таких змін у бак можна заливати й чистий етанол, якби не вимоги до холодного пуску: для нього, власне, і потрібні легкі фракції бензину в складі E85 та його аналогів (наприклад, БЮ-100 і А-98 БЮ).

При цьому слід врахувати, що в 1 л етанолу міститься на 37 % менше енергії, ніж у 1 л бензину. Хоча це недолік частково компенсує більш високе октанове число, 1 л E85 та його аналогів є еквівалентним 0,75...0,80 л нафтового.

У 2007 р. Університет Північної Дакоти і Центр автомобільних досліджень Міннесоти (MnCAR) опублікували результати досліджень енергоефективності застосування біоетанолу на транспорті. Були задіяні як звичайні автомобілі, так і машини з двигунами FFV.

Досліджувалися спиртобензинові суміші із вмістом етанолу від 2 до 85 %. Для звичайних автомобілів (Toyota Camry і Ford Fusion) оптимальної виявилася суміш E20 (при цьому споживання палива скоротилося на 1 % порівняно з бензином), для автомобілів з двигунами FFV (Chevrolet Impala) – E30 (на 15 %).

1.8 Стандарти на суміші бензину з етанолом

Нині стандартизовано досить багато сумішей бензину з етанолом, які, зазвичай, позначають літерою E (від Ethanol – етанол) і числом, яке відображає масову частку спирту в відсотках (табл. 1.7).

Серед таких сумішей найпоширенішими є:

– E5, E7, E10 – суміші з невеликим умістом етанолу. Їх застосовують, переважно, для зменшення токсичності вихлопу, економії бензину шляхом його заміщення й заміни токсичного метил(трет)бутилового ефіру (МТБЕ), який донедавна використовували як основну кисневу антидетонаційну добавку.

При цьому найбільшого поширення набула суміш E10 (газохол), яку використовують у США, Данії, Таїланді тощо. За океаном паливо E10 стало популярним після набуття чинності обмеженнями на застосування МТБЕ. Нині до 10 % етанолу містить майже третина палива, що реалізують у США;

– E20, E25 – суміші, що пропонують виключно бразильські автозаправні станції (оскільки етанол у цій країні є набагато дешевшим, ніж нафтопродукти, його вміст у паливі E20 нерідко сягає 40 %);

– E85 – стандартне паливо для автомобілів із двигунами у виконанні FFV, поширених, переважно, у США й Бразилії.

Так, на початку 2007 р. двигуни у виконанні FFV мали 15 % бразильських автомобілів. До 2015 р. їхня частка може сягнути 70 %. У 2007 р. тут

було продано 2 млн біопаливних автомобілів (86 % ринку нових автомобілів), тоді як у 2003 р. – лише 48 тис. (4 %).

Таблиця 1.7 – Вимоги національних стандартів до біоетанолу

Характеристика	Країна				
	Бразилія	Канада	США	ФРН	Польща
Об'ємна частка етанолу, %, не менше	99,3	98,7	92,1	99,8	99,6
Об'ємна частка метанолу, %, не більше			0,50		
Води, %, не більше		0,1 мас.	1 об.		0,4 об.
Концентрація альдегідів у перерахунку на ацетальдегід, г/л, не більше				0,004	0,20
Концентрація кислот у перерахунку на оцтову, г/л, не більше	0,03	0,03	0,07 %		0,03
Концентрація ефірів у перерахунку на етилацетат, г/л, не більше				0,002	0,20
Сухий остаток, г/л безводного етанолу, не більше			0,05		0,02
Концентрація міді, мг/кг, не більше	0,07	0,10	0,10		0,10
Концентрація хлоридів, мг/кг, не більше		10,0	5,0		40,0
Об'ємна частка денатурантів, %	3,0	*	1,9...4,8		

* 1 л бензину на 100 л етанолу

Оскільки етанол є менш енергоємним джерелом, ніж бензин, пробіг машин, що працюють на E85, на одиницю об'єму палива становить приблизно 75...80 % пробігу бензинових автомобілів. У зв'язку з цим E85 коштує на 10...15 % дешевше, ніж преміальний бензин.

Окрім Бразилії й США, паливо E85 досить активно застосовують у Швеції;

– E95 – суміш 95 % етанолу й 5 % паливної присадки, розроблювана компанією Scania з 1980-х для автобусів із дизельними двигунами в межах програми BEST (BioEthanol for Sustainable Transport);

– E100 (acool). Через високу гігроскопічність етилового спирту під паливом із позначенням E100, зазвичай, розуміють не чистий етанол, а його азеотропну суміш (96 % C_2H_5OH + 4 % води).

В Україні національні стандарти на біоетанол відсутні. Діє лише декілька технічних умов, згідно з якими ряд підприємств, зокрема заводи концерну «Укрспирт», випускають невеликі партії спиртових сумішей, які за більшістю параметрів відповідають паливу E85. До них належать ТУ У 24.6-33616799-01:2006 «Паливо моторне БІО-100» (табл. 1.8), а також ТУ У 24.6-32962829-001:2007 «Паливо автомобільне А-98 БІО».

Таблиця 1.8 – Порівняльна характеристика вітчизняного та американського спиртового палива

Характеристика	ASTM D 5798-99: Паливо на основі етанолу для автомобілів з іскровим запаленням			ТУ У 24.6-33616799-01:2006: Паливо моторне БІО-100
	Клас леткості			
	1	2	3	
Об'ємна частка етанолу й вищих спиртів, %, не менше	79	74	70	50
Об'ємна частка вуглеводнів, у тому числі денатурантів, %	17...21	17...26	17...30	не нормується
Тиск пари за температури 37,8 °С, кПа	38...59	48...65	66...83	35...70 ¹
Концентрація свинцю, мг/л, не більше	2,6	2,6	3,9	13
Масова частка сірки, мг/кг, не більше	210	260	300	500
Об'ємна частка метанолу, %, не більше	0,5	відсутність		не нормується
Масова частка води, %, не більше	1			відсутність ²
Кислотність за оцтовою кислотою, мг/кг, не більше	50			–
Кислотність, мг КОН на 100 см ³ палива, не більше	–			3,0
Концентрація фактичних смол, мг/100 см ³ , не більше	5			5
Загальний вигляд	візуально не містить завислих частинок			

¹ У технічних умовах температурою випробувань названа 25 °С.

² Імовірно, мається на увазі відсутність хімічно не зв'язаної води

1.9 Чому в Україні майже не застосовують паливний біоетанол

Біопаливо поки що незнайоме українським споживачам. Тож для формування первинного попиту на нього потрібно якнайбільше інформації. Вітчизняні автомобілісти мусять усвідомити, чому вони повинні відмовитися від звичних А-95 і А-98, і які переваги дасть такий крок. Поки ж їм пропонують заливати в бак продукт, який не відповідає не лише європейським, але й вітчизняним стандартам (усе спиртове паливо випускають згідно з технічними умовами, одержати які досить легко).

До того ж, усім відомо, як насторожено ставляться до появи нових марок палива учасники автомобільного ринку. Коли навесні 2007 р. на кількох десятках українських автозаправних станцій (АЗС) з'явилося пальне з маркіруванням БІО-100, що на 56 % складається з етилового спирту, представник офіційного дилера Audi AG в Україні заявив: «Ті відгуки, які ми чуємо, поки що суперечливі».

Потрібно, щоб хтось став «експериментатором», але щодо Audi ми такого не чули. Радити його своїм клієнтам не ризикнемо». Ще категоричніше була в 2007 р. оцінка дилера Peugeot: «Це паливо в Україні не рекла-

мують, сертифікація його нам невідома. Відкрили пару заправок – і все. Невідомо, що там продають під цією маркою. Своїм клієнтам ми просто не можемо рекомендувати використовувати цю паливо».

Через брак інформації суперечки щодо того, чи шкодить біопаливо автомобілю, не вщухають. При цьому навіть ті компанії, що займалися просуванням БІО-100 на ринку, не сприяли припиненню полеміки. Наприклад, тоді як у рекламних проспектах зазначалося, що «БІО-100 можна заливати в баки автомобілів усіх марок», трейдери, які торгували ним, помічали: «Якщо машина вимагає низькооктанового бензину, із БІО-100 краще не експериментувати».

Навіть споживачі відзначали прорахунки в просуванні нової марки: «Дивний якийсь маркетинг: раз у БІО октанове число 100, то воно має продаватися за ціною 98-го. Незалежно від собівартості», – а представник офіційного дилера Audi AG в Україні підкреслював: «Потрібна відповідна кількість точок заправки, і щоб ціна була реально конкурентоспроможною».

Безсумнівно, зашкодили БІО-100 і незакінченість його випробувань, і постійні нагадування про сумішеву природу нового товару, що викликає недовіру в споживача з 1999 р., коли на вітчизняних заправках з'явилося багато сурогатів, що ховалися під марками А-92ЕК, А-95ЕК.

Сумнів у правильності просування БІО-100 викликало і його позиціонування. Замість того щоб запропонувати продукт, доступний власникам величезного парку (близько 2,8 млн) радянських автомобілів, розробники БІО-100 захотіли будь-що зайняти преміальний сегмент. Відповідно до їхньої ідеї, нове паливо мало замінити «елітний» бензин А-98, використовуваний, переважно, господарями позашляховиків.

При цьому розробники явно переоцінили обсяг цього сегменту - виявилось, що не так багато покупців готові платити за дороге паливо невідомого складу. І хоча в компанії, яка реалізовувала це паливо, стверджували, що «є приклад, коли нашим постійним клієнтом став власник «Таврії», у це важко було повірити (особливо коли згадати, що літр БІО-100 коштував у 2007 р. 4,10 грн за середньої ціни А-95 3,70 грн/л).

Водночас, мало хто з водіїв, хто володіє «кораблями на колесах», наважився без достатніх підстав заправлятися паливом, яке не асоціюється в свідомості з продуктами європейської якості.

Схоже, що прикріші маркетингові помилки в нашій країні часто-густо пов'язані з поспіхом, з якою та чи інша компанія намагається вивести продукт на ринок. Деякі маркетингологи вважають, що в Україні найважливіше – це випередити конкурентів. Мовляв, хто перший, той і виграв. Почасти такий підхід справедливий – новатором бути непогано, проте, з іншого боку, побічними явищами такого поспіху є грубі й часто фатальні прорахунки.

Класичний сценарій просування складається з низки нехитрих віх: потрібно дослідити ринок, на який планується вивести новий товар, знайти нішу, де він може зайняти достойне місце, і визначити його потенційних

покупців. Щоправда, за вітчизняних умов на ці вимоги часто не звертають уваги. Як наслідок, будь-яка рекламна кампанія перетворюється на гроші, викинуті на вітер, а перспективний і потрібний продукт, яким є пальне з приставкою «біо», реалізують погано, причому не тим, не там і не так.

1.10 Висновки

Безсумнівно, біоетанол має цілу низку переваг порівняно з традиційними видами палива, як екологічних, так і експлуатаційних. Але ці переваги не мають бути нівельовані можливими негативними екологічними наслідками, пов'язаними з неправильним землекористуванням чи застосуванням застарілих технологій. При цьому біоетанол, як і будь-яке інше біологічне паливо, не є панацеєю від енергетичних хвороб України. Його впровадження вимагає розв'язання цілого ряду проблем, обумовлених наступним:

- біопаливо зазвичай виробляють із рослинної сировини, кількість якої обмежена потребами харчової промисловості;

- використання менш енергоефективних технологій поки не дозволяє зменшити вищу порівняно з традиційним паливом собівартість виробництва біоетанолу;

- через наявність кисню спиртове паливо має меншу енергоемність, ніж його вуглеводневі аналоги, що позначається на ефективності його використання та експлуатаційних характеристиках;

- застосування спиртового палива не дає гарантії скорочення викидів токсичних газів;

- будь-яке біологічне паливо користується обмеженою підтримкою з боку споживачів (оскільки його експлуатаційні та економічні характеристики вимагають поліпшення), автовиробників (яких, передусім, турбує його корозійна активність), нафтовиків і переробників (розглядають його як конкурента).

Не слід забувати й про те, що біопаливо – такий же вичерпний ресурс, як і нафта, оскільки під час його одержання «витрачається» (часто – необоротно) родючість земель сільськогосподарського призначення. Тому вирощувана в нашій країні сировина для виробництва біопалива має спрямовуватися насамперед на задоволення потреб українських споживачів, і завдання держави – цьому всіляко сприяти.

2 ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

Називати біодизель новим паливом буде не зовсім вірно, оскільки експерименти з ним були започатковані ще в ХІХ ст. Перший двигун, що працював на олії з насіння сосни (із перспективою використання як палива звичайної рослинної олії), був продемонстрований на Всесвітній виставці 1900 р. самим Рудольфом Дизелем. Але після тріумфальної ходи дешевого нафтового палива інтерес до біодизеля згаснув, відродившись лише в кризові 1970-ті.

На комерційні рейки випуск біодизельного палива було поставлено у початку 1990-х, насамперед у тих країнах, що оцінили реальні довгострокові вигоди від застосування цього ресурсу і прийняли відповідні рішення щодо його підтримки.

2.1 Що таке біодизель?

Термін «біодизель» дещо розмитий і не має чіткого визначення. Спочатку біодизелем називали суміш 95...70 % нафтового палива з 5...30 % олії. Проте наявність гліцерину в таких продуктах зумовлювала наявність нагару на розпилювачах форсунок, закоксовуванню поршневих кілець і прогоранню клапанів двигуна, що швидко виводило його з ладу (саме тому дехто вважає, що біодизель не можна застосовувати в чистому вигляді, а лише як добавку).

Сьогодні під біодизелем здебільшого розуміють біопаливо на основі рослинних або тваринних жирів (олій), а також продуктів їхньої (пере)естерифікації.

2.2 Переваги й недоліки біодизеля

Застосування біодизеля як моторного палива зменшує емісію практично всіх шкідливих речовин. Зокрема, для біодизеля марки В100 викиди вуглеводнів порівняно з нафтовим аналогом скорочуються на 56 %, твердих частинок – на 55, оксидів вуглецю – на 43, оксидів азоту – на 5...10, сажі – на 60 %. При цьому виділяється стільки ж вуглекислого газу, скільки було спожито з атмосфери рослиною, що є вихідною сировиною для виробництва олії.

У чистому біодизельному паливі присутнє трохи більше 15 ppm сірки і не міститься ароматичних сполук. Завдяки природному походженню біодизельне паливо є менш токсичним, ніж нафтове, і в разі потрапляння в ґрунт чи воду не завдає шкоди рослинам і тваринам.

З іншого боку, воно піддається практично повному біологічному розкладу: у ґрунті чи воді мікроорганізми за 28 днів переробляють 99 % біодизеля, що дозволяє казати про мінімальне забруднення рік і ставків. Ефі-

ри рослинних олій добре змішуються з нафтовим дизельним паливом і не розшаровуються навіть за наявності розчиненої води.

Серед інших переваг біодизеля:

- добрі змащувальні властивості, які традиційне паливо втрачає в разі видалення з нього сполук, що містять сірку. Біодизель, попри значно менший уміст сірки, завдяки своєму хімічному складові (зокрема, наявності кисню) має кращі змащувальні властивості;

- вище цетанове число (щонайменше 51);

- висока температура спалаху (понад 150 °С), що робить біопаливо порівняно безпечним;

- повнота згоряння завдяки присутності до 10 % кисню;

- значне (до 60 %) збільшення ресурсу двигуна. Так, до Книги рекордів Гіннеса 2005 р. занесена вантажівка, що проїхала на біодизелі В100 без ремонту оригінального двигуна понад 1,25 млн км.

Біодизель має й недоліки, зокрема:

- меншу енергоємність, а також більшу секундну й питому ефективну витрату порівняно з нафтовим паливом. Оскільки теплота згоряння біодизеля нижче, ніж у звичайного (37,8 і 42,7 МДж/кг відповідно), його потрібно на 9 % більше за об'ємом (чи 15 % за масою). У середньому 1 л біодизеля є еквівалентним 0,9 л звичайного дизельного палива;

- відносно високу температуру помутніння. Протягом холодної пори року необхідно або підігрівати біопаливо, що надходить із паливного бака в паливний насос, або працювати на паливних сумішах із вмістом біодизеля не вище 80 %;

- гігроскопічність, тобто здатність поглинати вологу з атмосфери. Присутність незв'язаної води призводить до корозії елементів паливної апаратури, а за низьких температур – до утворення в них льоду;

- агресивність до гумових деталей.

2.3 Сировина для біодизеля

Основною сировиною для біодизеля є жирні, рідше – ефірні олії таких культур:

- ріпак (Європа) – дозволяє одержати до 1190 л олії з гектара. Ріпак – універсальна культура, на яку припадає близько 10 % загальної площі посівів олійних культур у світі. В Європі ріпак може скласти гідну конкуренцію соняшнику. Трохи поступаючись останньому і перевершуючи сою за олійністю, ріпак здатний щорічно давати стабільні врожаї у середньому 20...25 ц/га (середня врожайність соняшнику 10...12 ц/га). Поліпшуючи структуру ґрунтів та їхній фітосанітарний стан, збагачуючи їх азотом та іншими мікроелементами, ріпак є чудовим попередником зернових (особливо пшениці), значно збільшуючи їхню врожайність;

- соя (США, Аргентина) – 446 л/га;

- канола (Канада) – 1000 л/га;

- кастор (Бразилія) – 1410 л/га;
- ятрофа (Індія) – 1900 л/га;
- пальма (Індонезія, Філіппіни) – до 5900 л/га. Пальмову олію використовують для виробництва біодизельного палива з 1987 р. Але через високу температуру помутніння (11 °С) його застосування обмежено країнами з тропічним кліматом.

Потенційні можливості використання інших олійних культур для одержання біодизельного палива ще не повністю досліджені. Застосування горіхових олій розпочато в Нікарагуа, дослідження з використання бавовняної олії успішно проведені в Греції. У Індії біопаливо отримують з ядер горіха, що зростає на незручних і, через це, не використовуваних землях.

У помірних широтах біодизельне паливо можна одержати з олії соняшнику, рицини, конопель. У Великій Британії, окрім ріпаку, використовують відпрацьовану олію, обсяги якої сягають 70 млн л на рік. До сировинної бази для виробництва біодизеля можна також віднести сировину м'ясокомбінатів (тваринні жири), рибний жир, водорості та іншу сировину.

В енергозалежних країнах розвитку технічного напрямку в сільську господарстві приділяють великої уваги.

Вважають, що в середньостроковій перспективі попит на олійне насіння в ЄС зростатиме швидше, ніж попит на продукцію кормового й продовольчого ринків, виводячи аграрний сектор на новий рівень притоку капіталу.

Донедавна сільське господарство могло розраховувати лише на частину коштів, яке витрачає людство на продукти харчування. Але цих доходів, за поміркованих цін і попиту, було недостатньо, оскільки підтримка аграрного сектора потребувала великого навантаження на бюджет держав.

Можливість забезпечити споживачів екологічно чистою енергією надає сільському господарству новий напрямок розвитку. Виробництво біодизеля дозволяє ввести в оборот сільськогосподарські землі, які раніше не використовували, створити нові робочі місця.

Для дальшого поступу галузі аграрії мають уважно стежити за сучасними тенденціями ринку, перерозподіляючи посівні площі і не забуваючи про те, що відчуження завеликих площ під вирощування сировини для біодизеля (на яких слід використовувати підвищені дози засобів захисту рослин) може призвести до деградації ґрунтів та погіршення їхньої якості.

В Україні для виробництва біодизеля використовують переважно ріпак (хоча на внутрішній ринок йде лише 20 % врожаю). За оцінками Мінагрополітики, потенційні можливості України у вирощуванні цієї культури становлять орієнтовно 3 млн га, за середньої врожайності 15...30 ц/га.

У масштабах країни перероблення 75 % врожаю ріпаку забезпечить виробництво до 2,7 млн т біодизеля. Такі обсяги останнього еквівалентні за енергетичною цінністю 2,3 млн т звичайного дизельного палива, для одержання якого необхідно переробити 7,7 млн т нафти.

Сприятливі умови для вирощування ріпаку існують у Вінницькій, Жи-

томирській, Івано-Франківській, Київській, Львівській, Волинській та інших областях.

На жаль, нині в більшості господарств ріпак розміщують за випадковими попередниками, що не сприяє отриманню високих урожаїв (зазвичай вони не перевищують 9...12 ц/га). Між тим, урожайність цієї культури можна суттєво збільшити (до 25...30 ц/га), якщо використовувати чотири-пільну сівозміну з таким чергуванням:

– пар (чистий чи сидеральний, тобто коли до першої половини літа парове поле займають рослинами-сидератами, які потім заорюють у ґрунт як зелене добриво);

– ріпак (ярий та озимий);

– пшениця (ярова та озима);

– ярові зернові (ячмінь чи овес).

Запропоновано також вирощувати ріпак в п'ятипільній сівозміні з таким чергуванням культур:

– пар;

– озимі ріпак і рапс;

– озима пшениця;

– ярові ріпак і рапс;

– ярові зернові.

Насиченість наведених сівозмін ріпаком – відповідно 25 і 40 %.

Ріпак виносить з ґрунту в 1,5 рази більше поживних речовин, ніж зернові культури. Тож для отримання 20 ц/га олійного насіння вважають нормальним внесення 1,5 ц/га складних добрив (азот/фосфор/калій = 10:26:26) і 3 ц/га аміачної селітри за непаровими попередниками.

За наявності захисту від шкідників, хвороб і бур'янів товарний ріпак цілком можливо вирощувати на одному полі через 1...2 роки. При цьому необхідно значно менше площ і господарств, що спеціалізуються на вирощуванні ріпаку.

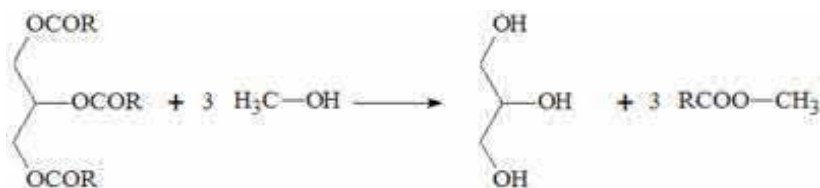
Вважається, що одне господарство в сівозміні із зерновими культурами й чистим паром може вирощувати ріпак на площі 200 га, маючи ланку механізаторів і парк, що складається з шести тракторів МТЗ-1211, двох комбайнів Дон-1500, а також 18 одиниць сільгоспмашин за обов'язкової наявності сушильно-сортувальної техніки.

Для отримання 300 тис. т олійного насіння на площі в 2000 га, у разі вирощування не більше 200 га в одному господарстві, таких господарств в Україні має бути 1250. Відповідно, спеціалізованих господарств для вирощування ріпаку знадобиться вчетверо менше.

2.4 Технологія виробництва біодизеля

Із хімічної точки зору біодизельне паливо є сумішшю метилових (етилових) ефірів насичених і ненасичених жирних кислот. Під час (пере)етерифікації олії реагують із метиловим (етиловим) спиртом у присут-

ності каталізаторів (зазвичай, лужних – NaOH, NaOCH₃ чи KOH). Завдяки цьому утворюються складні ефіри, а також гліцерина фаза (56 % гліцерину, 4 % метанолу, 13 % жирних кислот, 8 % води, 9 % неорганічних солей, 10 % ефірів):



До очищеної від механічних домішок олію додають метиловий спирт і луг, що є каталізатором реакції переестерифікації, а потім нагрівають отриману суміш. Після відстоювання та охолодження рідина розшаровується на дві фракції – легку і важку. Легка фракція є метиловим ефіром, важка – гліцерином.

Для отримання 1000 кг (1136 л) біодизельного палива необхідно затратити 50 кВт теплової й 25 кВт електричної енергії. Витрати сировинних компонентів становлять:

- 1040 кг (1143 л) ріпакової олії;
- 144 кг (114 л) 99,8 %-ого метанолу (має бути присутнім у надлишку);
- 19 кг 88 %-ного їдкого калі (KOH);
- 6 кг допоміжного фільтрувального матеріалу;
- 105 кг води.

При цьому крім кінцевого продукту одержують 117 кг спрацьованої води й 200 кг сирого гліцерину, що застосовують у косметичній і фармацевтичній промисловості.

Базовими технологіями під час виробництва біодизельного палива є:

- циклічна з використанням лужних каталізаторів (рис. 2.1);
- безкаталізаторна циклічна (із застосуванням розчинників, зазвичай, тетрагідрофурану);
- багатореакторна безперервна (рис. 2.2).

Переваги й недоліки названих технологій наведено в табл. 2.1. Їхній вибір залежить від потрібних обсягів виробництва, виду вихідної сировини та її якості, способів очищення від спиртів і каталізатора. За обсягів виробництва біодизельного палива від 500 до 5000 т/рік, зокрема на заводах, що працюють із сировиною невисокої якості, кращою є проста циклічна технологія з використанням каталізаторів. Для великих обсягів виробництва (понад 5 тис. т біодизеля на рік) слід обирати багатореакторну безперервну технологію, що висуває суворіші вимоги до якості вихідної сировини.

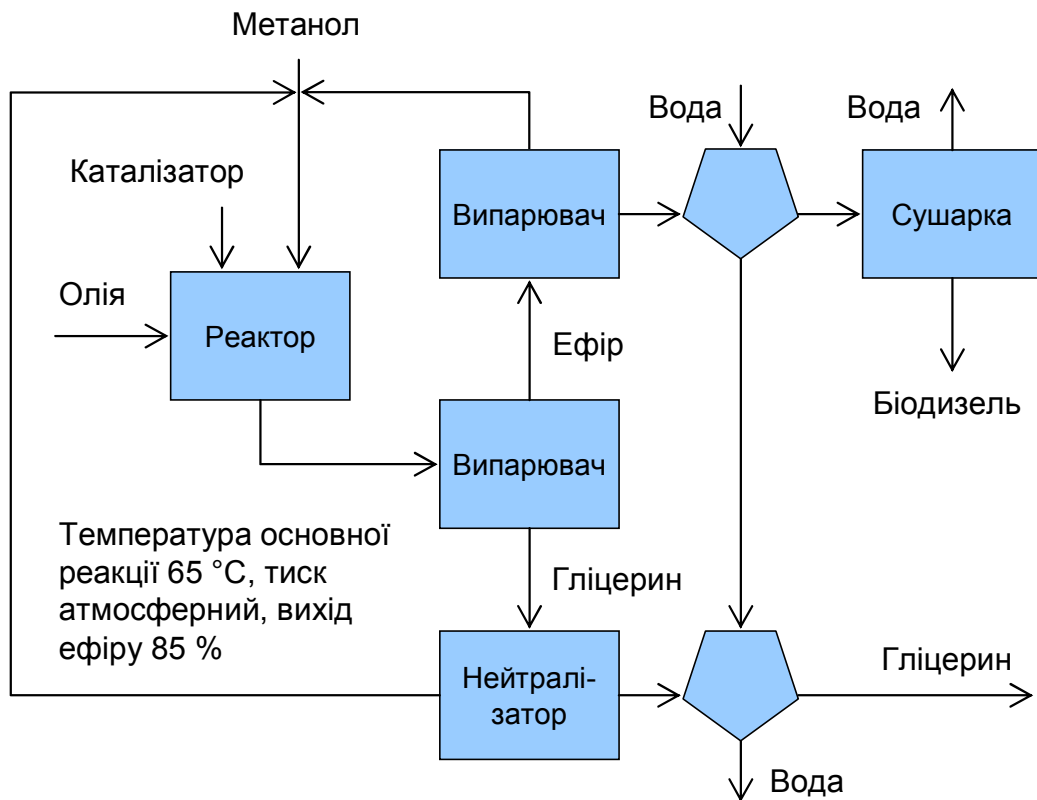


Рис. 2.1 – Циклічна каталітична схема виробництва біодизеля

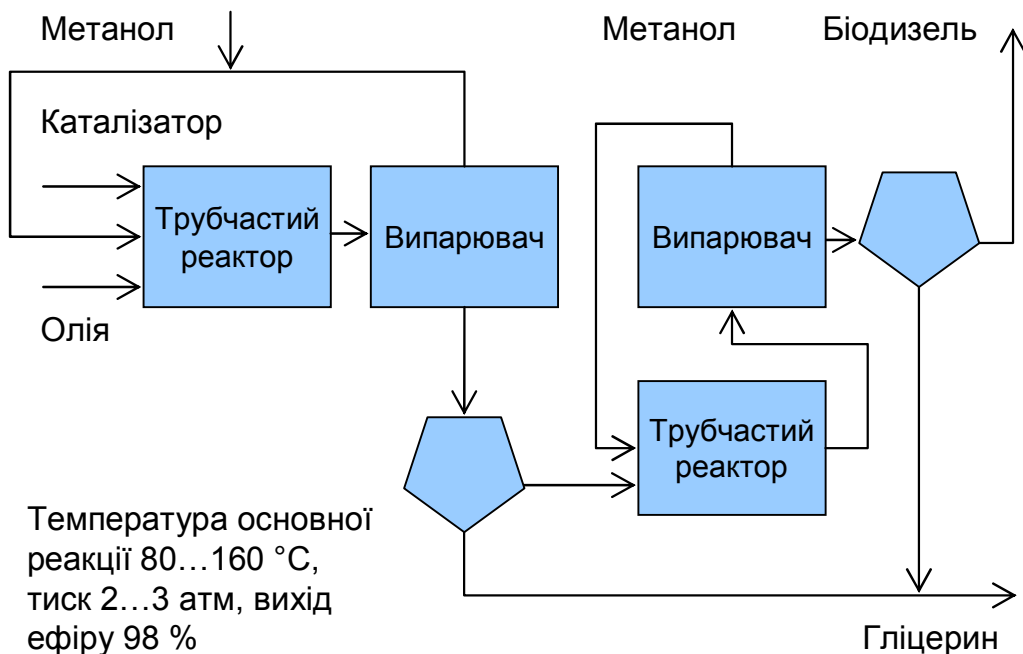


Рис. 2.2 – Багатореакторна безперервна схема виробництва біодизеля

Технологію виробництва біодизельного палива вдосконалюють у багатьох країнах. При цьому перспективним вважають орієнтуватися на перероблення біомаси в рідкий продукт з використанням каталітичних про-

цесів. В Україні в цьому напрямі активно працює УкрНДІНП «МАСМА», де, зокрема, розроблено безвідходну технологію отримання метилових (етилових) ефірів із жирних кислот, а також рослинних і тваринних жирів.

Таблиця 2.1 – Базові технології одержання біодизельного палива

Назва технології	Характеристика	Переваги	Недоліки
Циклічна із застосуванням каталізаторів	температура реакції близько 65 °С, тиск атмосферний, тривалість реакції від 20 хв. до 2 год., кількість каталізатора – 1,5 % від маси олії, вихід ефіру – близько 85 % від загальної маси біодизеля	<ul style="list-style-type: none"> • відносна простота технологічного процесу • невисока вартість технологічної лінії • можливість використання сировини невисокої якості 	<ul style="list-style-type: none"> • невисокий вихід ефіру • тривалість реакції
Безкаталізаторна циклічна	температура реакції 30 °С, тиск атмосферний, тривалість реакції 5...10 хв., розчинник – тетрагідрофуран, вихід ефіру – близько 98 % від загальної маси біодизеля	<ul style="list-style-type: none"> • високий вихід ефіру • невисока температура и велика швидкість реакції • чистота продуктів 	<ul style="list-style-type: none"> • потреба в дорогих і агресивних розчинниках • необхідність використання додаткового обладнання
Багатореакторна безперервна	температура реакції 80...160 °С, тиск 2...3 атм, тривалість реакції – від 6...10 хв., кількість каталізатора – до 1 % від маси олії, вихід ефіру – до 98 % від загальної маси біодизеля	<ul style="list-style-type: none"> • високий вихід ефіру • неперервність процесу • швидкість реакції 	<ul style="list-style-type: none"> • складність технологічного процесу • достатньо висока вартість технологічної лінії • висока чутливість до якості сировини

2.5 Стандарти на біодизельне паливо

Властивості біопалива ще недостатньо вивчені, тому більшість чинних на сьогодні стандартів обмежується зазначенням граничних значень відсотка (пере)етерифікації, температури помутніння й застигання, кількістю загального й вільного гліцерину тощо. Зазначені характеристики є компромісом між вимогами автомобілебудівників, які виступають за чисте паливо взагалі без домішок, і бажанням виробників біодизельного палива впроваджувати прості і недорогі технології виробництва.

Вочевидь, уведення жорсткіших стандартів на біодизель збільшить його вартість, тоді як лояльніші можуть призвести до виникнення різних несправностей під час експлуатації транспортних засобів. Обидві можливості, безумовно, вплинуть на майбутнє сприйняття палива на ринку.

Аналіз зарубіжних стандартів на біодизельне паливо й рекомендацій УкрНДІНП «МАСМА», який розробив єдиний чинний в Україні нормати-

вний документ у цій сфері – СБУ 24.14-37-561:2007 «Ефіри метилові жирних кислот для дизельних двигунів. Вимоги й фізичні методи оцінки», дозволяє зробити висновок про те, що базою для розроблення вітчизняного стандарту, який визначатиме технічні умови на біодизельне паливо, може стати європейський стандарт EN 14214:2003 «Автомобільні палива. Метилові ефіри жирних кислот для дизельних двигунів (fatty acid methyl esters – FAME). Вимоги й фізичні методи тестування» (табл. 2.2)*.

Таблиця 2.2 – Європейський стандарт на біодизельне паливо EN 14214:2003

Параметр	Значення		Метод тестування
	мін.	макс.	
Цетанове число	51		EN ISO 5165
Масова частка ефіру, %	96,5		EN 14103
Густина за температури 15 °С, кг/м ³	860	900	EN ISO 3675 і 12185
В'язкість за температури 40 °С, мм ² /с	3,5	5	EN ISO 3104
Температура спалаху, °С	120		ISO / CD 3679
Масова концентрація сірки, мг/кг		10	EN ISO 20846 і 20884
Вуглецеві залишки (у 10 % залишку), %		0,3	EN ISO 10370
Масова частка сульфурованої золи, %		0,02	ISO 3987
Масова концентрація води, мг/кг		500	EN ISO 12937
Масова концентрація механічних домішок, мг/кг		24	EN 12662
Корозія мідної пластинки (3 год за 50 °С)		Клас 1	EN ISO 2160
Стабільність до окислення за температури 110 °С, год	6		EN 14112
Кислотне число, мг КОН/г		0,5	EN 14104
Йодне число		120	EN 14111
Масова частка, %			
метилового ефіру ліноленової кислоти		12	EN 14103
поліненасичених метилових ефірів		1	
метанолу		0,2	EN 14110
моногліцеридів		0,8	EN 14105
дигліцеридів		0,2	EN 14105
тригліцеридів		0,2	EN 14105
вільного гліцерину		0,02	EN 14105 і 14106
гліцерину, загалом		0,25	EN 14105
Масова концентрація лужних металів (Na + K), мг/кг		5	EN 14108 і 14109
Масова концентрація фосфору, мг/кг		10	EN 14107

При цьому на етапі освоєння виробництва нового для України продукту в цей документ можуть бути внесені такі поправки, що враховують реальні можливості вітчизняного виробника:

– збільшення гранично допустимого вмісту води в продукті з 0,05 до 0,15 %. У разі використання наявної системи транспортування й збереження біопалива води в ньому накопичується втричі більше, ніж встановлено європейським стандартом. Тому необхідно чи збільшити гранично допустиму норму, чи транспортувати й зберігати біодизельне паливо у спеціальних водонепроникних умістищах окремо від тих, що використовують для дизельного;

* Відповідний стандарт було затверджено під час підготовки монографії до друку.

- збільшення гранично допустимого змісту вільного гліцерину з 0,02 до 0,05 %. Цю вимогу стандарту встановлено, виходячи з властивості гліцерину вивільняти зв'язану воду. Якщо гранично допустимий вміст води в паливі буде підвищено, з'явиться можливість збільшити і вміст вільного гліцерину;
- встановлення норми щодо мінімального вмісту антибіотика, необхідного для запобігання зростанню кількості мікроорганізмів у біодизельному паливі, яке не використовують відразу після приготування;
- зниження мінімальної температури спалаху до 55 °С. Більшістю національних стандартів цей показник установлено на рівні 120 °С, хоча для нафтового палива він дорівнює ~55 °С. Установлення єдиного показника не вплине на цетанове число й змащувальну здатність палива та одночасно дозволить збільшити граничну концентрацію спиртів із 0,2 до 0,5 %;
- обмеження рівня зв'язаного гліцерину значенням 0,08 %, що дозволить уникнути кристалізації моногліцеридів;
- установлення обмежень на вільні жирні кислоти, мила й залишковий каталізатор, що відсутні в чинних стандартах. Це справедливо, поки використовують лужний каталізатор і промивають паливо після реакції. Обмеження кількості золи в стандартах передбачає низький вміст згаданих компонентів. Однак у майбутньому, можливо, використовуватимуть кислотні каталізатори, прийнятні для спрацьованої олії, або знайдуть альтернативу промиванню водою. У зв'язку з цим може постати питання щодо запровадження відповідних норм;
- запровадження гранично допустимого пероксидного числа (максимального ступеня окислення палива, що використовують у дизельних двигунах). Для розроблення норм за цим показником необхідні подальші дослідження та випробування (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Вплив домішок на якість біодизельного палива

Домішка	Граничний вміст	Проблеми, зумовлені наявністю домішки	Зменшення впливу
Вода	понад 0,15 %	корозія деталей системи подавання палива й паливних баків; зростання популяцій мікроорганізмів, що засмічують фільтри й сприяють корозії	подвійне очищення, вакуумування, додавання антибіотика
Вільний гліцерин	понад 0,05 %	утворення відкладень; вилучення води і зв'язаного гліцерину з палива	промивання
Зв'язаний гліцерин	понад 0,3 %	утворення вуглецевих частинок на паливних форсунках і поршневих кільцях; кристалізація	додержання технології
Спирт	понад 5 %	зниження цетанового числа й температури спалаху; зменшення змащувальної здатності палива	промивання з наступним вакуумуванням
Жирні кислоти, мила	понад 0,02 %	золоутворення	
Пероксиди водню	понад 70 одиниць	окислення біопалива; руйнування гумових прокладок; утворення нерозчинних клеїв та осадів	

2.6 Планування й будівництво біодизельних заводів

Обсяги капітальних вкладень для будівництва біодизельного заводу є, зазвичай, нижчими, ніж для спорудження біоетанольного, і значною мірою залежать від виду запланованої для перероблення сировини. Є низка досліджень із цього питання, опублікованих компаніями Shumaker, Agri-Industry Modeling & Analysis Group, Independent Biodiesel Feasibility Group, BIOX, Lurgi тощо. Одну з оцінок капітальних затрат для будівництва «в чистому полі» заводу з попереднім обробленням олійної сировини наведено на рис. 2.3 і 2.4. Точність оцінювання $\pm 25\%$.

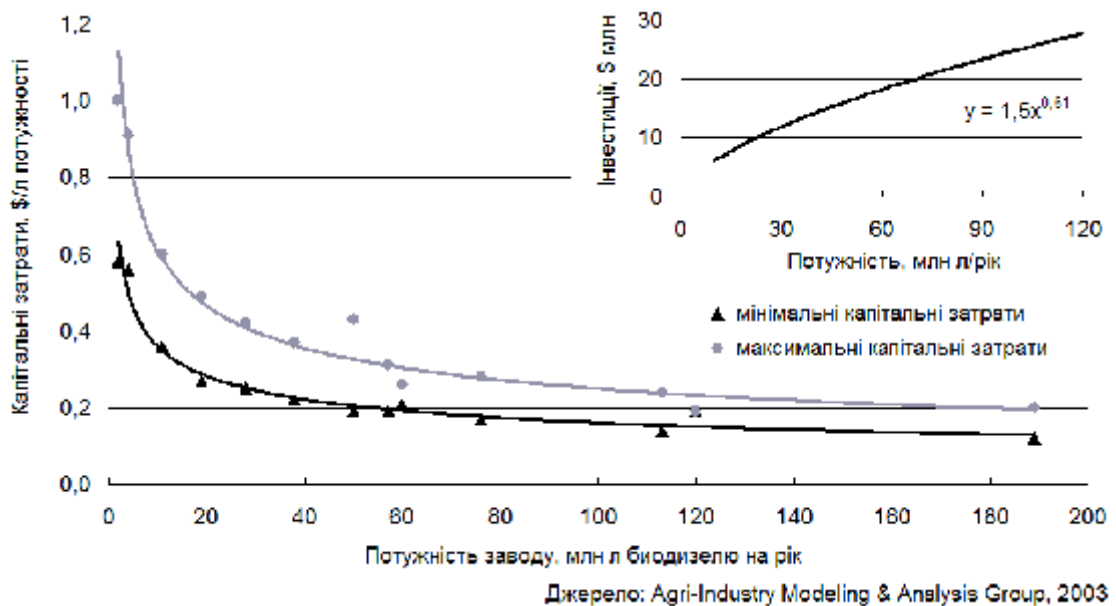


Рис. 2.3 – Відносні затрати зростають у разі будівництва заводу потужністю менше 15 млн л біодизеля на рік

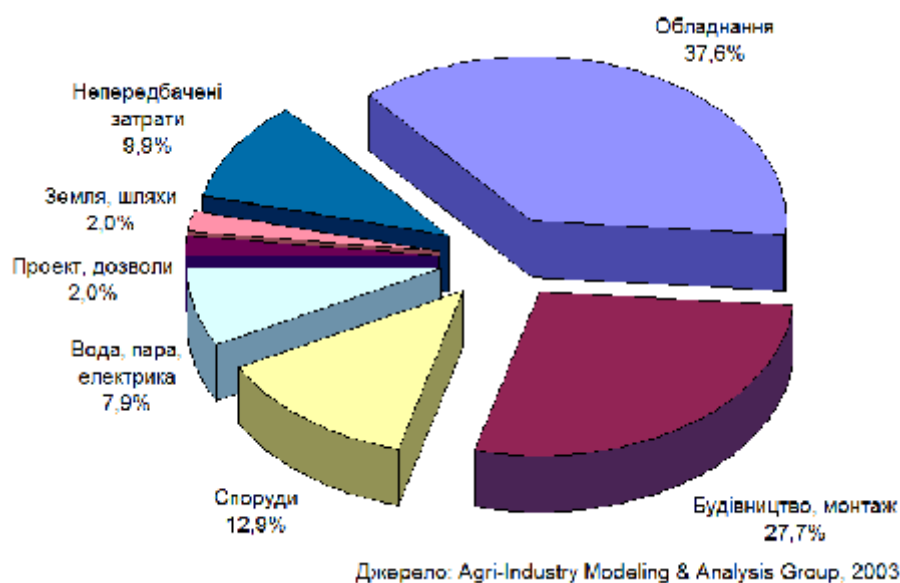


Рис. 2.4 – У разі будівництва біодизельного заводу потужністю 1,9 млн л/рік понад третина капітальних затрат (\$0,4 млн із \$1,1 млн) припадає на обладнання

Проте незалежно від обсягу вкладень єдиним способом отримати добре працюючий біодизельний завод є проведення ретельного й детального планування ще до початку будівництва. При цьому необхідно:

- провести детальне дослідження кон'юнктури ринку щодо всіх продуктів (не лише основних продуктів реакції, але й жирних кислот, гліцерину та інших побічних продуктів). Така інформація може суттєво вплинути на економіку заводу;

- змодельювати розвиток ринку, зважаючи не тільки на оптимістичні тенденції збільшення попиту на біодизель, але й, наприклад, можливість обвалу цін на гліцерин;

- розглянути можливість інтегрування заводу в уже існуючі комплекси. Зокрема, має сенс розташування заводів із виробництва біоетанолу й біодизеля в одній майданчику. Це дозволяє: врахувати особливості сівозмін (ріпак, зазвичай, чергують із пшеницею); забезпечити гнучкість використання сировини; скоротити бюрократичну тяганину під час оформлення дозволів на виробництво; забезпечити можливість використання для виробництва біодизеля власного етанолу замість небезпечного з екологічної погляду метанолу; скоротити експлуатаційні витрати;

- проаналізувати переваги й недоліки різних варіантів розташування заводу. При цьому вибір майданчика, зазвичай, визначається: наявністю ділянки землі площею 4...8 га (із буферної зоною); можливістю отримання дозволів на будівництво хімічного виробництва; наявністю доступу до дешевої сировини (80 % собівартості – ціна сировини!); наявністю автомобільної дороги й залізниці, здатних забезпечити мінімальні транспортні витрати й зручність відвантаження продукції споживачу; наявністю води, електричної енергії, а також робочої сили;

- передбачити забезпечення технологічної гнучкості заводу;

- отримати реальні зобов'язання від основних потенційних клієнтів;

- проаналізувати можливості попереднього оброблення сировини, уважно поставитися до вибору каталізатора й проблем забезпечення безпеки праці та екологічної безпеки виробництва.

Усім суб'єктам господарювання, які розробляють чи освоюють серійне виробництво біопалива, або планують виробляти його за ліцензією, слід керуватися такими нормативними документами:

- ГОСТ 15.001-88 Система разработки и постановки на производство. Продукция производственно-технического назначения;

- ДСТУ 2960-94 Організація промислового виробництва. Основні поняття. Терміни та визначення;

- ДСТУ 3021-95 Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення;

- ДСТУ 3278-95 Система розробки та постановка продукції на виробництво. Основні положення та визначення;

- ДСТУ 4311:2004 Система розробки та постановки продукції на виробництво. Продукція нафтопереробки і нафтохімії. Основні положення.

Розробка і постановка біодизельного палива на виробництво передбачає:

- розробку технічного завдання;
- затвердження технічної, технологічної й нормативної документації – технологічних регламентів, технічних умов (ТУ У), стандартів організацій України (СВУ), державних стандартів України (ДСТУ);
- виготовлення й випробування лабораторних, дослідних, дослідно-промислових партій із підписанням протоколів випробувань;
- приймання результатів роботи державною приймальною комісією;
- підготовку та освоєння виробництва.

Окремі із зазначених робіт можна поєднати, а також змінити їхню послідовність чи доповнити іншими роботами. При цьому виробник має засвідчити відповідність своєї продукції вимогам безпеки, охорони праці й навколишнього середовища.

На жаль, ці вимоги нерідко порушують. Зокрема, у багатьох компаній відсутня ліцензія на роботу з метиловим спиртом. Нерідко сирий гліцерин, що містить до 15 % метанолу, виливають на поля як «добриво». Безумовно, такий шлях освоєння виробництва біодизельного палива завдає великої шкоди навколишньому середовищу.

2.7 Застосування біодизельного палива

Біодизельне паливо можна використовувати у вихоро- і передкамерних дизельних двигунах, а також у двигунах із безпосереднім упорскуванням, як у чистому вигляді (в адаптованих двигунах), так і в сумішах із нафтовим паливом без змінення конструкції двигуна.

Біодизельні суміші позначають літерою В і числом, що відповідає масовій частці біодизеля у відсотках. Хоча змішування можна здійснити в будь-якій пропорції, юридичні тонкощі оподаткування спричинили появу двох основних типів такого палива – В2-В5 і В30 (для громадського транспорту).

Перед початком експлуатації двигуна на біодизельному паливі слід промити фільтри грубого й тонкого очищення, а також замінити гумові паливні шланги й прокладки на полімерні. В окремих випадках знадобиться частіше змінювати моторні мастила, здатні зріджуватися у разі потрапляння в них біодизельного палива. У разі холодного пуску, можливо, зростатиме шумність двигуна. До того ж:

- підвищення густини й кінематичної в'язкості сприяє збільшенню дальності паливного факела і діаметра крапель розпиленого палива, що покращує потрапляння палива на стінки камери згоряння й гільзи циліндра;
- менший коефіцієнт стиску забезпечує збільшення кута випередження впорскування палива й максимального тиску в форсунці;
- високе цетанове число сприяє скороченню періоду затримки запа-

лення і менш «жорсткій» роботі двигуна;

– підвищена температура спалаху в закритому тиглі (120 °С і більше) забезпечує пожегобезпечність;

– наявність кисню (10 %) дозволяє інтенсифікувати згоряння й забезпечити вищу температуру в циліндрі дизельного двигуна, що сприяє підвищенню індикаторного та ефективного ККД двигуна.

Задля збереження номінальних параметрів двигуна після його переведення на біодизельне паливо слід відрегулювати паливну апаратуру, щоб збільшити циклову подачу палива. Певний зростання викидів NO_x можна компенсувати шляхом зменшення дійсного кута випередження впорскування палива, рециркуляцією спрацьованих газів, подаванням води на впуску.

2.8 Обсяги виробництва біодизельного палива

Останніми роками за умови галопуючих цін на традиційні енергоносії біодизельна індустрія процвітає (рис. 2.5, табл. 2.4). За станом на 01.03.09 у світі працювало 456 біодизельних заводів загальною потужністю 67,18 млн т на рік.

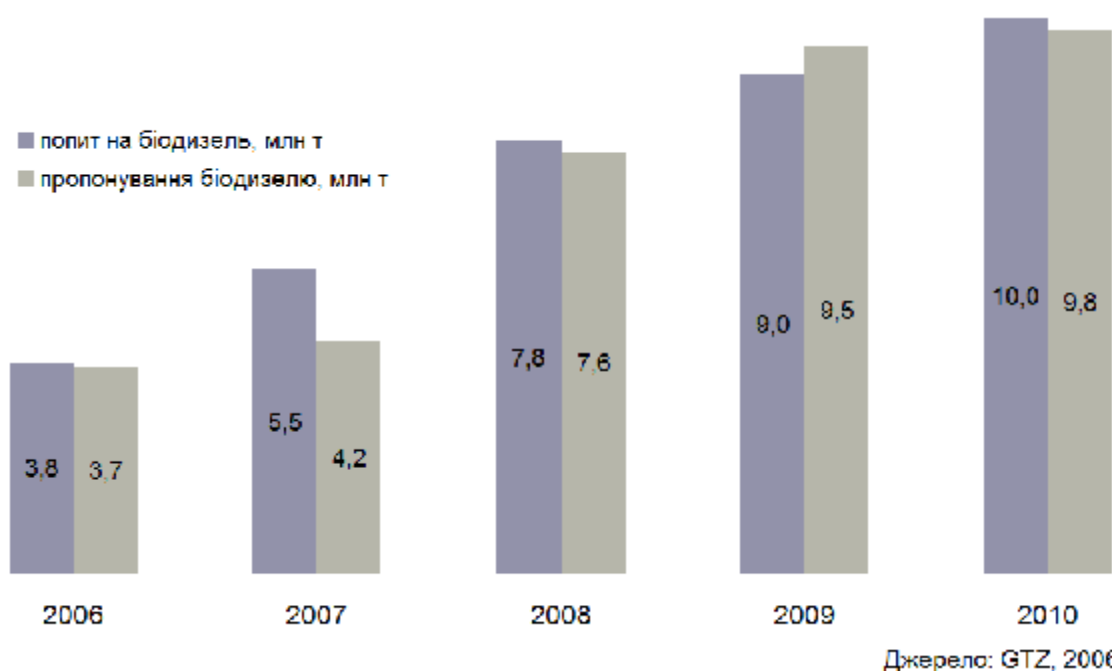


Рис. 2.5 – Дефіцит біодизеля в країнах Євросоюзу буде спостерігатися щонайменше до 2010 р.

Зокрема, в ЄС існує стільний, стабільний і зростаючий рік у рік ринок біопалива з уніфікованими стандартами й зобов'язаннями. Трійку його лідерів очолює Німеччина, яка випускає понад 44 % загального обсягу європейського біодизеля (рис. 2.6). Далі йдуть Італія й Франція – 14 і 13 % відповідно. При цьому в Німеччині з 1995 до 2006 р. потужності з виробництва біодизеля зросли з 0,1 до 3,4 млн т.

Торік 23 німецькими підприємствами виготовлено 2,7 млн т цього палива, що на 61 % більше, ніж у 2005 р. В Італії виробництво біодизельного палива в 2006 р. збільшилося вдвічі, а після того як у 2007-2009 рр. запрацювали три нові заводи, її потужності зросли до 1,15 млн т.

До речі, італійські виробники біодизеля використовують в основному імпортовані олії, на частку яких припадає до 70 % їхнього загального споживання. Натомість, для Франції виробництво біодизеля забезпечують шість заводів, один з яких розташований в Німеччині. Наприкінці 2007 р. було завершено будівництво ще двох підприємств. Це дозволило збільшити потужності до 900 тис. т на рік, для повного завантаження яких потрібно ще 620...750 тис. га рапсових плантацій (у 2006 р. посівні площі оцінювалися на рівні 1,35 млн га).

Таблиця 2.4 – Динаміка виробництва біодизельного палива в 2004-2008 рр.

Країна	Обсяги виробництва, тис. т (США – млн л), за роками				
	2004	2005	2006	2007	2008 ¹
Австрія	57	85	134	267	485
Бельгія	– ²	1	85	166	665
Болгарія	–	–	–	–	215
Велика Британія	9	51	445	150	726
Греція	–	3	75	100	565
Данія	70	71	81	85	140
Естонія	–	7	20	0	135
Іспанія	13	73	224	168	1267
Італія	320	396	857	363	1566
Латвія	–	5	8	9	130
Литва	5	7	10	26	147
Мальта	–	2	2	1	8
Польща	–	100	150	80	450
Португалія	–	1	146	175	406
Словаччина	15	78	89	46	206
Словенія	–	8	17	11	67
Угорщина	–	–	12	7	186
Фінляндія	–	–	–	–	170
Франція	348	492	775	872	1980
ФРН	1035	1669	2681	2890	5302
Чехія	60	133	203	61	203
Швеція	1	1	52	63	212
Разом у країнах ЄС	1933	3184	6069	5713	16000
	Обсяги виробництва, млн л				
США	94,5	283,5	2200	–	–
Аргентина	–	25,0	50	–	–
Бразилія	–	–	–	450	–

¹ Сумарна потужність діючих заводів

² Дані відсутні

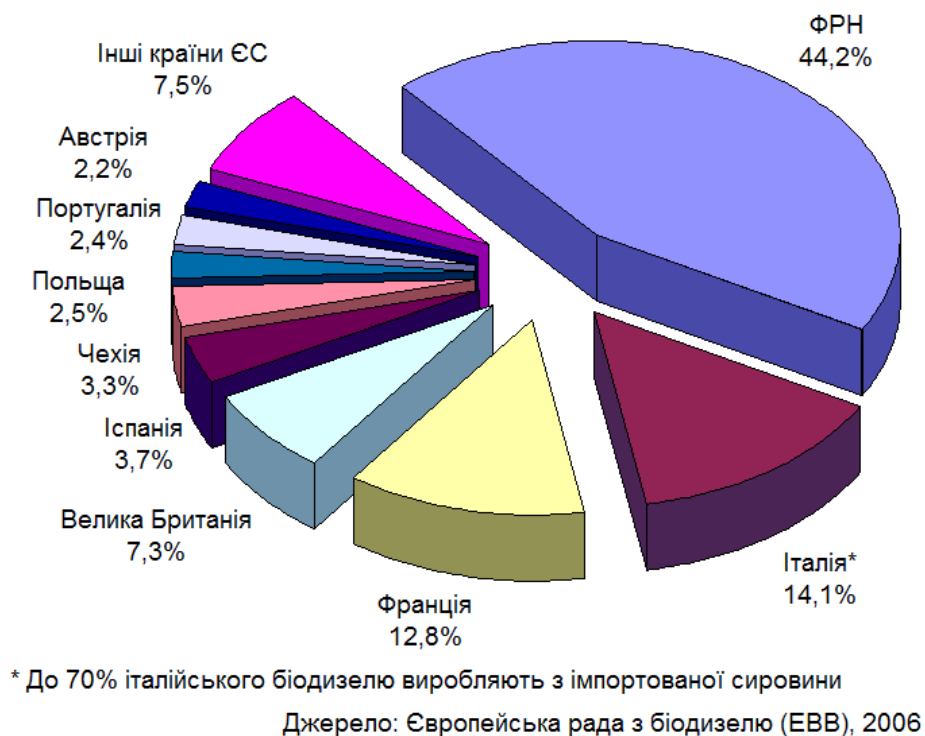


Рис. 2.6 – У Німеччині виробляють майже половину європейського біодизеля

Державна підтримка сільського господарства, пільгове оподаткування, суворість екологічного законодавства в багатьох енергозалежних країнах (насамперед, європейських) зробили виробництво й реалізацію біодизеля вигідною справою, хоча ціни на нього досі вище, ніж на традиційне нафтове.

У середньому виробництво 1 л біодизеля коштує у Європі \$0,65 і значною мірою залежить від вартості сировини, потужності й типу заводу, а також вартості побічних продуктів (гліцерину й макухи – корму, багатого на протеїни).

З огляду на меншу енергоємність біодизеля, мінімальні затрати на його виробництво становлять трохи менше \$0,90/л нафтового еквівалента (за собівартості традиційного дизелю \$0,45/л). Інакше кажучи, загальний обсяг субсидій для заміщення 10 % нафтового палива біологічним лише в одній Німеччині дорівнює \$1,26 млрд щорічно.

Попри це, нова енергетична політика, розроблена Євросоюзом, підтримуватиме зростання біодизельної індустрії принаймні до 2020 р. Зокрема, Директива 2003/30/ЄС з використання біологічних джерел енергії зобов'язує членів ЄС до 2010 р. забезпечити збут такої кількості біопалива, яка відповідала б 5,75 % загального обсягу паливного ринку.

Щоб зробити ці плани реальністю, країнам-членам ЄС слід випускати щорічно понад 10 млн т біодизеля (у 2006 р. його було вироблено трохи більше 6 млн т), побудувавши додатково близько 80 заводів (табл. 2.5). На перший погляд, не так багато, проте для вирощування такої кількості ріпаку знадобиться близько 7 млн га землі, що нереально.

Таблиця 2.5 – Протягом останніх років у провідних країнах ЄС виробництво рапсу скорочується, а його імпорт зростає

Країни	Виробництво		Імпорт		Експорт	
	тис. т					
	2006	2007	2006	2007	2006	2007
ЄС-27	15338	15658	15979	17409	14154	16690
ЄС-15	12001	11952	14756	16895	10199	9701
ФРН	5337	5307	7324	7519	1446	1421
Франція	4145	4620	343	1118	7168	6420
Польща	1652	2113	494	145	604	1618

Натомість, в Україні і грудні 2006 р. було затверджено Програму розвитку біодизельного палива на 2007...2010 рр. з орієнтовним обсягом фінансування 9 млрд грн (у тому числі близько 70 млн – кошти державного бюджету). У межах програми передбачалося інтенсифікувати рапсосіяння, зокрема завдяки створенню регіональних зон концентрованого вирощування цієї культури (площею 50...70 тис. га).

До 2010 р. планувалося збільшити посівні площі ріпаку до 10 % загальної площі ріллі з доведенням щорічних урожаїв до 7,5 млн т і переробленням на біопаливо щонайменше 75 % вирощеного ріпаку. Передбачалося також побудувати щонайменше 20 заводів потужністю від 5 до 100 тис. т для заміщення не менше 623 тис. т дизельного палива.

Програма мала реалізовуватися в два етапи. На першому (2007...2008 рр.) передбачалося сформувати сировинну, технічну й технологічну базу для вироблення біодизеля, а також розробити нормативні документи з питань його виробництва й використання. На другому (2008...2010 рр.) планувалося реалізувати пріоритетні інноваційні проекти будівництва заводів із виробництва біопалива в зонах концентрованого вирощування ріпаку.

На жаль, попри прийняття цього та інших нормативних актів, що регулюють відносини у сфері обороту біодизельного палива, його промислове виробництво в Україні досі відсутнє.

Задля справедливості слід відзначити, що низка компаній Вінницької, Чернівецької, Тернопільської та інших областей випускає дослідні партії біодизеля за узгодженими з УкрНДІНП «МАСМА» технічними умовами і згідно з розробленим інститутом СВУ 24.14-37-561:2007 «Ефіри метилові жирних кислот для дизельних двигунів. Вимоги та фізичні методи оцінки». Проте обсяги такого виробництва є незначними.

У зв'язку з цим виникає серйозна загроза перетворення України на країну-донора для держав-членів ЄС, хоча біодизель відіграє ключову роль у забезпеченні надійності постачання пального й скороченні викидів парникових газів на транспорті і може стати новим джерелом доходів для аграріїв.

2.9 Можливості вироблення біодизеля з мікробіодоростей

Паливна криза 1970-х надала поштовх низці проектів, зокрема, з отримання дизельного палива з синьо-зелених водоростей. Проте розроблені тоді технології виявилися занадто дорогими, а затрати на виробництво такого палива – зависокими. Однак сьогодні непередбачувані ціни на енергоносії й досягнення сучасної біотехнології вдихнули нове життя в забуті дослідження.

Під водоростями (лат. *Algae*) розуміють різні, переважно, водні організми, що містять хлорофіл і виробляють органічні речовини в процесі фотосинтезу. Із «паливного» погляду найбільшу цікавість викликають мікробіодорості, які живуть практично скрізь, де є волога, і нараховують понад сто тисяч видів. Для їхнього зростання потрібні сонячне світло, двоокис вуглецю й вода.

У процесі фотосинтезу, завдяки якому сонячна енергія перетворюється на хімічну, мікробіодорості акумулюють у клітинах ліпіди і жирні кислоти. Деякі з видів дають у 15 разів більше олії з гектара, ніж традиційні культури, такі як ріпак, пальма чи соя (табл. 2.6). Інші ростуть так швидко, що у три-чотири рази на день подвоюють свій розмір.

Таблиця 2.6 – Вихід олії з різних джерел

Джерело олії	Річний вихід олії, л/га
Кукурудза	160...170
Соя	440...460
Соняшник	950...1000
Рапс	1100...1200
Кокосова пальма	2600...2700
Пальмова олія	5900...6000
Мікробіодорості (досягнуті показники)	17 300
Мікробіодорості (теоретичні лабораторні показники)	
до 30 % мас. олії в біомасі	46 800...58 700
до 70 % мас. олії в біомасі	140 000...158 000

Джерело: Permaculture Activist, 2007

Пошук найбільш придатних для вироблення біопалива рослин триває й досі, оскільки водорості з високим вмістом олії, зазвичай, ростуть повільніше, ніж інші. Наприклад, водорості, що містять до 80 % ліпідів, діляться лише один раз протягом 10 днів, тоді як ті, що містять 30 % – тричі на день.

З іншого боку, види, здатні до виробництва великої кількості ліпідів, роблять це в разі нестачі поживних речовин. Однак такий недолік ще більше уповільнює їхнє зростання. Деякі дослідники сподіваються генетично змінити водорості, щоб вони давали більше олії. Інші створюють жовті водорості, що дозволяють сонячним променям глибше проникати у воду і сприяти рівномірнішому зростанню.

У 1978...1996 рр. міністерство енергетики США фінансувало дослі-

дження водоростей із високим вмістом олії за програмою Aquatic Species Program. Тоді вчені дійшли висновку, що для промислового виробництва водоростей у відкритих ставках придатні тільки Каліфорнія, Гаваї й Нью-Мексико – штати з високою середньою температурою та її невеликими коливаннями протягом доби.

У пропонованих районах водорості вирощували в ставках площею 1000 м² протягом 6 років. Урожайність становила при цьому 50 г/м² щодня. Інакше кажучи, 200 тис. га ставків (менше 0,1 % доступних для цієї мети земель) здатні забезпечити паливом 5 % американських автомобілістів протягом року (один нафтопереробний завод займає приблизно 500 га).

Крім технологій «відкритого» типу сировину вирощували й у малих біореакторах, розташовуваних біля джерел дешевої теплоти низького потенціалу (атомних чи теплових електростанцій). Теплові викиди ТЕС і ТЕЦ здатні забезпечити до 77 % потреб таких установок в енергії.

Наприкінці 1990-х програму з отримання палива з водоростей було згорнуто через низьку вартість нафти (до \$15/бар.), але в 2007 р. дослідження поновили. Агентство DARPA у співробітництві з Honeywell (UOP LLC), General Electric та університетом Північної Дакоти спонсорувало розроблення авіаційного палива з такої сировини.

У грудні 2007 р. Shell і BioPetroleum HR утворили СП для будівництва на Гавайських островах пілотного підприємства з виробництва невеликих обсягів олії та її перетворення на біопаливо.

Про будівництво заводів із виробництва біодизеля з водоростей оголошували:

- Global Green Solutions (Канада) за технологією компанії Valcent Products (США) – потужність 4 млн бар. на рік;
- Bio Fuel Systems (Іспанія);
- De Beers Fuel Limited (ПАР) за технологією Greenfuel Technologies Corporation (США) – потужність 900 млн галонів біодизеля на рік (водорості + олія);
- Aquaflow Bionomic Corporation (Нова Зеландія) – потужність 1 млн л біодизеля на рік.

Розглядаючи мікрowodорості як паливну сировину, слід сказати, що вони є єдиною олійною культурою, з якої не виробляють продовольство, корми та інші сільськогосподарські продукти. Згодом цей факт може стати визначальним, оскільки в ЄС вже визнають, що, агітуючи за біобензин й біодизель (у Німеччині, Франції, Австрії, Чехії під ріпак уже відведено до 14 % ріллі), там не припускали, до чого це може призвести.

Дедалі більша популярність нетрадиційних видів палива встигла суттєво вплинути на ціну на зерно та олію. Перепрофілювання посівних площ, зниження врожайності, зростання споживання – усе це може спровокувати глобальну кризу на продовольчому ринку. У доповіді «Біоенергія, що не завдає шкоди навколишньому середовищу» експерти ООН підкреслюють, що до збільшення частки біопалива в енергетичному балансі необхідно

продумати систему вирощування й відновлення харчових культур. Стан справ можна змінити, використовуючи для виробництва біодизеля олію, отриману з мікроводоростей. Справа за малим – навчитися ефективно переробляти вологу біомасу в продукт, придатний для паливних баків автомобілів.

Нині існує два основних методи вирощування водоростей. Для першого застосовують ряд послідовно розташованих резервуарів, пов'язаних між собою прозорими трубами на опорах. Водорості й воду прокачують крізь труби, забезпечуючи максимальний вплив на них сонячного світла. Закачуваний в установку вуглекислий газ живить водорості.

Ризик забруднення водоростей є дуже малим, оскільки вони живуть за умов, близьких до лабораторних. Урожайність також висока, устаткування займає невелику площу, проте його вартість досить велика (для промислового виробництва потрібно декілька кілометрів труб), суттєві й затрати з обслуговування труб.

Альтернативний метод полягає в прокачуванні води крізь замкнений відкритий канал. У цьому каналі циркулює приблизно стільки ж води, як у 50-метровому плавальному басейні. Відкриті водойми дешевше замкнутих систем, але в них є недоліки: сонячне світло сягає лише водоростей, що перебувають біля поверхні, вода легко випаровується, важче керувати температурою (якщо вночі вона набагато нижча, ніж удень).

Зростає й ризик забруднення, оскільки у відкриті водойми частіше потрапляють організми, які харчуються водоростями. Ще однією проблемою для обох систем є велика витрата води, яку слід оновлювати щодня, попередньо витримуючи в темряві.

Збирання водоростей і вироблення з них олії – ще одна перешкода. Розміри мікроводоростей є надто малими для їхнього збирання шляхом фільтрації води. На підприємствах, що вирощують водорості для фармацевтичної промисловості, використовують інші способи, такі як центрифугування або введення хімікатів, що сприяють склеюванню водоростей. Проте обидва ці методи є дорогими у промисловому використанні.

Існує також декілька методів виділення ліпідів та їхнього оброблення для одержання біодизельного палива. Звичайні методи одержання олії з водоростей полягають у видавлюванні її з висушеної сировини чи додаванні хімікатів. При цьому олія має бути обробленою ще й перед використанням її як палива стандартними методами, застосовуваними для сировини, одержуваної із сільськогосподарських культур.

Головна мета, що стоїть перед дослідниками, – зниження собівартості виробництва біопалива з водоростей. Результат можна буде вважати задовільним, якщо вдасться досягнути рівня \$0,5/л. Основні (й ще невирішені) проблеми полягають у забезпеченні стабільного щоденного приросту біомаси й доведення технології отримання палива до комерційно доцільного рівня.

2.10 Висновки

Виробники нетрадиційних видів палива повільно, але вірно відвоюють у нафтовиків свою частку ринку, зокрема й України (рис. 2.7).

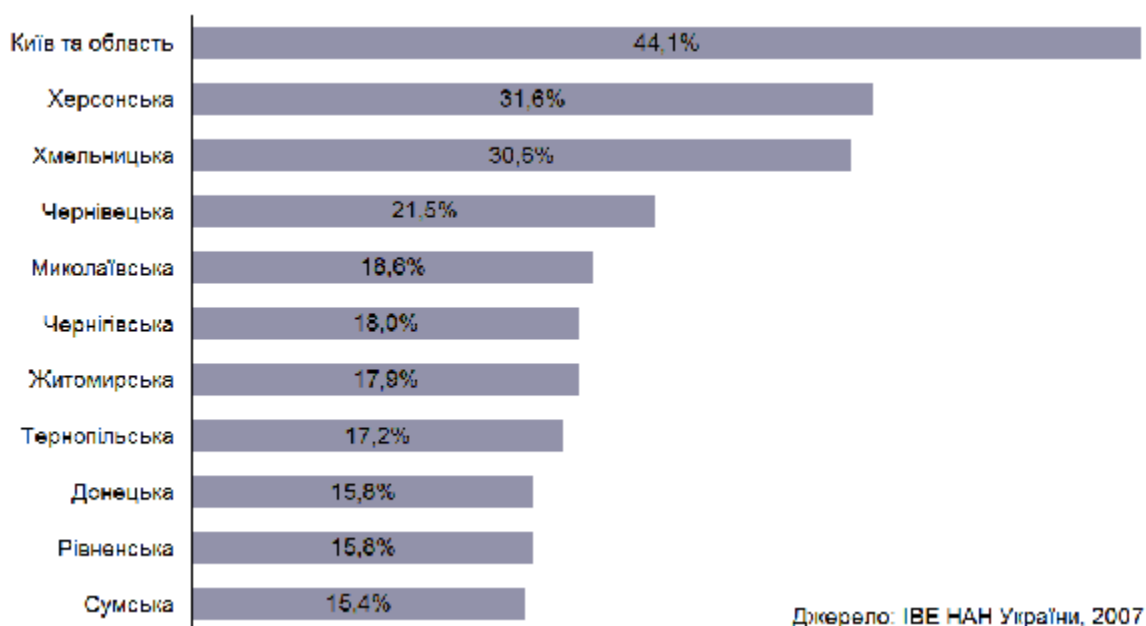


Рис. 2.7 – У 11 регіонах України від 15 до 44 % нафтового палива може бути замінено біологічним

Вітчизняне нафтове лобі вже не є настільки сильним, як на початку 2000-х, і дедалі частіше пасує перед аграрним чи газовим. Свою роль у закріпленні такого статус-кво відіграють і створені останнім часом Асоціації скрапленого газу та біопалива. Такі організації вже не нагадують «клуби малинових піджаків» і здатні не лише закликати владу до діалогу, але змушувати її прислухатися до своєї думки, встановлювати правила поведінки на ринку, розробляти внутрішні стандарти й механізми контролю їхнього дотримання.

Із появою таких асоціацій відходить у минуле й звичне сприйняття їх як корпоративних додатків фірм, чиї керівники використовують їхній авторитет задля власного просування (нерідко – політичного).

Проте конфронтація між нафтовиками та аграріями, переробниками й хіміками нічого, крім шкоди, не принесе. Нашу країну з її 7 млн автомобілів, кількість яких щорічно зростає на 7...9 %, неможливо забезпечити паливом тільки завдяки «альтернативним» ріпаку й кукурудзі, замінивши бензини А-95 та А-98 етанолом і паливом БЮ-100, а дизельне паливо марки Л-0,2-62 - біодизелем чи диметилловим ефіром.

Зростання попиту на нові товари, сировиною яких є сільськогосподарська продукція, цілком здатне призвести до перепрофілювання земель, розширення посівних площ за рахунок неконтрольованої вирубки лісів і врешті-решт - до збідніння екосистем та ерозії ґрунтів. У країнах-донорах,

де будуть вирощуватися паливні культури, можуть різко зрости ціни на землю і, як наслідок, на продовольство.

На жаль, цю проблему в Україні не порушують, хоча кустарний випуск біопалива з неконтрольованим технологічним процесом виробництва та утилізацією відходів вже сьогодні завдає непоправної шкоди енергетичному потенціалові вітчизняних чорноземів та екології України.

2.11 Рекомендації щодо розвитку біопаливної галузі України

Для сталого розвитку біопаливної галузі України потрібен послідовний і системний план дій, розрахований щонайменше на десять років. На думку авторів, було б доцільно зробити такі комплексні кроки в цьому напрямі:

1. Фіскальна підтримка:

– запровадити податок, що стимулюватиме виробників змішувати традиційне пальне з біологічним. Податок має стягуватися з кожного реалізованого літра палива. Дистриб'ютори не мають сплачувати цей податок, якщо вони доведуть наявність установленної частки біодобавок у пропонованому ними паливі;

– встановити пільгову ставку акцизного збору для сумішевих видів палива. Ставка єдиного податку і максимальні обсяги палива, їй відповідні, повинні щорічно переглядатися для компенсації різниці у вартості звичайного і біологічного палива, щоб уникнути надвиробництва;

– диверсифікувати ставку акцизного збору залежно від частки біодобавки. Спочатку пільги мають стосуватися сумішей із вмістом біопалива 2...5 %, із поступовим переходом до сумішей із часткою 5...10 % і вище;

– повністю звільнити від податків, щонайменше на десять років, заводи з виробництва біопалива;

– зробити біопаливо обов'язковим до застосування, установивши спеціальну систему штрафів за порушення цієї вимоги;

– надати значні податкові пільги постачальникам біопалива високої якості та розпочати його виробництво у великих обсягах;

– забезпечити поступове скорочення державної підтримки із становленням ринку;

– розробити програму «Чисте місто», що сприятиме розвитку ринку біопалива.

2. Регуляторна підтримка:

– розробити підзаконні нормативні акти, що регулюють застосування біопалива;

– запровадити систему сертифікації й моніторингу стандартів якості;

– розробити вимоги до якості сумішевих видів традиційних нафтопродуктів із часткою біопалива понад 5 %, удосконалені регламенти зі скорочення викидів CO₂, встановлення рівнів мінімальної біодеградації,

забезпечення нульової токсичності води;
– створити інститут контролю якості.

3. Регіональний розвиток:

– розробити систему тендерів, за якою виробники біопалива зможуть отримувати офіційний довгостроковий сертифікат (терміном понад п'ять років) на постачання біопалива за державним замовленням;
– надавати інвестиційні гранти (до 20 % потреби в інвестиціях) для створення робочих місць у депресивних регіонах;
– субсидіювати безвідсоткові позики чи позики з мінімальним відсотковою ставкою для розвитку виробничих потужностей у депресивних регіонах;
– розробити для кожного регіону план отримання оптимальних (за економічною та енергетичною ефективністю, ступенем захисту ґрунтів і водних ресурсів) урожаїв.

4. Розвиток інфраструктури:

– підтримувати конкурентоспроможну інфраструктуру й технології - зокрема, парк автомобілів із двигунами FFV;
– створити інфраструктуру, що забезпечує збирання біологічної сировини та її транспортування;
– забезпечити безперебійні поставки енергетичної сировини на заводи залежно від форми врожаю, часу збирання, виду зібраного матеріалу, стадії зрілості, умов довкілля, географії й використання у переробленні;
– інтегрувати транспортування біопалива в уже існуючу транспортну інфраструктуру.

5. Екологічна раціональність:

– розробити екологічно раціональні стратегії використання земельних ресурсів, що враховують кліматичні, екологічні, соціально-економічні особливості регіонів;
– використовувати як первинну, так і вторинну сировину сільського й лісового господарства (рис. 2.8);
– розробити та ухвалити чіткі земельні закони, що чітко визначають землі для вирощування врожаю для запобігання ерозії ґрунтів і сприяння їхньому відновленню після використання;
– стимулювати застосування добровільних стандартів. Наприклад, безоплатне паркування чи додаткові вигоди за використання екологічно чистих транспортних засобів.

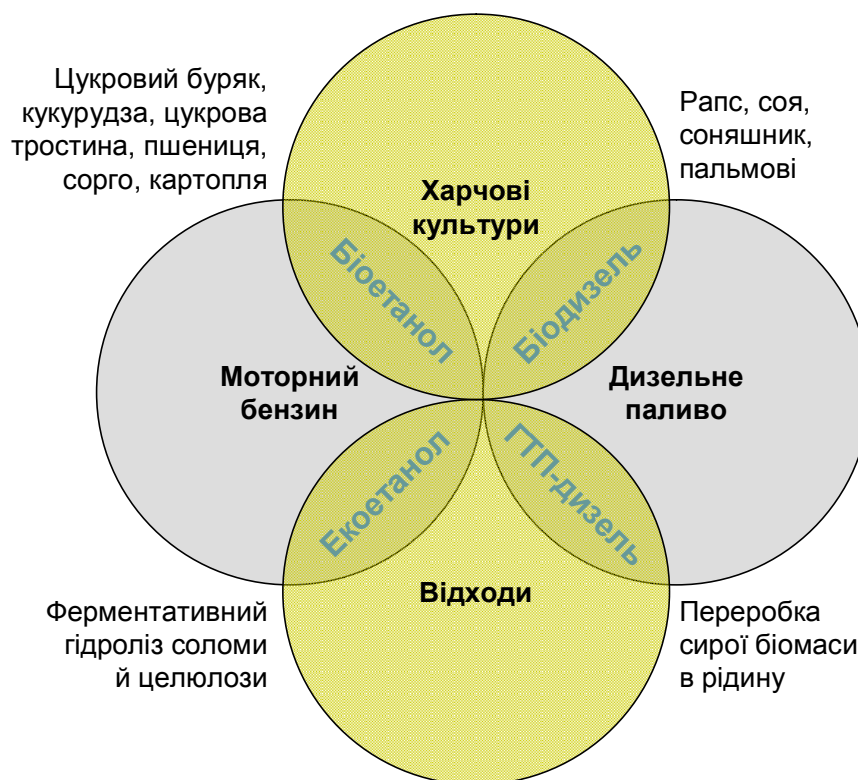


Рис. 2.8 – Якщо сировиною для біопалива першого покоління є харчові культури, то біопаливо другого покоління вироблятимуть із відходів

6. Інформування та освіта:

- позиціонувати продукти в певних сегментах ринку біопалива, створити позитивне ставлення до нього;
- запобігати заниженню цін на сировину, що негативно впливає на основних зацікавлених осіб – фермерів;
- сприяти розвиткові екологічно чистих видів палива на національному й регіональному рівнях, наприклад, шляхом створення іміджу екологічно чистих регіонів;
- активно залучати учасників ринку до публічної діяльності, створюючи імідж екологічно чистих компаній, наприклад, під слоганом «Ми піклуємося»;
- забезпечити доступність інформації щодо стимулів використання екологічно чистих видів палива для широкої громадськості;
- сприяти зміні іміджу біопалива в суспільстві, що сприймає його як неконкурентоспроможне паливо низької якості;
- надавати інформацію фермерам щодо переваг біопалива (про енергетичні врожаї, енергетичну цінність продовольчих урожаїв, а також залишків і побічних продуктів).

3 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

Метою досліджень, описаних у цьому розділі, було розроблення і подальше впровадження удосконаленої технології та високоефективного конкурентноздатного диспергувально-змішувального технологічного обладнання для приготування біопалива як альтернативного паливно-енергетичного ресурсу на основі узагальнення досліджень комплексного використання механічних і гідромеханічних методів, зокрема, диспергування та гомогенізації.

3.1 Доцільність застосування кавітації для інтенсифікації хіміко-технологічних процесів

Одним з ефективних методів інтенсифікації хіміко-технологічних процесів в рідинах є дія кавітації (гідродинамічної чи ультразвукової) на оброблюване середовище [6–20]. Кавітація є засобом локальної концентрації енергії низької густини у високу густину енергії, пов'язану з пульсаціями і закриттям бульбашок кавітацій. Тому її широко застосовують для інтенсифікації хіміко-технологічних процесів.

3.1.1 Види кавітації та напрями її практичного застосування

Кавітація (від лат. *cavitas* – порожнеча) – утворення в краплинній рідині порожнин, заповнених газом, паром чи їх сумішшю (кавітаційних бульбашок, каверн). Порожнини утворюються там, де тиск в рідині стає нижче за деяке критичне значення $P_{кр}$ (у реальній рідині $P_{кр}$ приблизно дорівнює тиску насиченої пари цієї рідини за цієї ж температури).

Якщо зниження тиску відбувається внаслідок великих місцевих швидкостей у потоці краплинної рідини, кавітацію називають *гідродинамічною*, а якщо внаслідок проходження акустичних хвиль – *акустичною*.

Гідродинамічна кавітація

Оскільки в реальній рідині завжди присутні найдрібніші бульбашки газу чи пари, то, рухаючись із потоком і потрапляючи в область тиску $P < P_{кр}$, вони втрачають стійкість і здатні необмежено зростати (рис. 3.1).

Після переходу в зону підвищеного тиску й вичерпання кінетичної енергії рідини, що розширюється, зростання бульбашки припиняється і вона починає меншати. Якщо бульбашка містить достатньо багато газу, то після досягнення нею мінімального радіусу вона відновлюється і здійснює декілька циклів затухаючих коливань. Якщо газу мало, бульбашка закривається повністю в першому періоді життя.

Таким чином, поблизу обтічного тіла (наприклад, у трубі з місцевим звуженням, рис. 3.2) створюється досить чітко обмежена «зона кавітації», заповнена рухомими бульбашками.

Зменшення кавітаційної бульбашки відбувається з великою швидкістю і супроводжується звуковим імпульсом (свого роду гідравлічним ударом) тим сильнішим, чим менше газу містить бульбашка. За розвиненої кавітації, коли у майже одночасно виникає і закривається безліч бульбашок, явище супроводжується сильним шумом із суцільним спектром від декількох сотень до сотень і тисяч кілогерців [6–11].

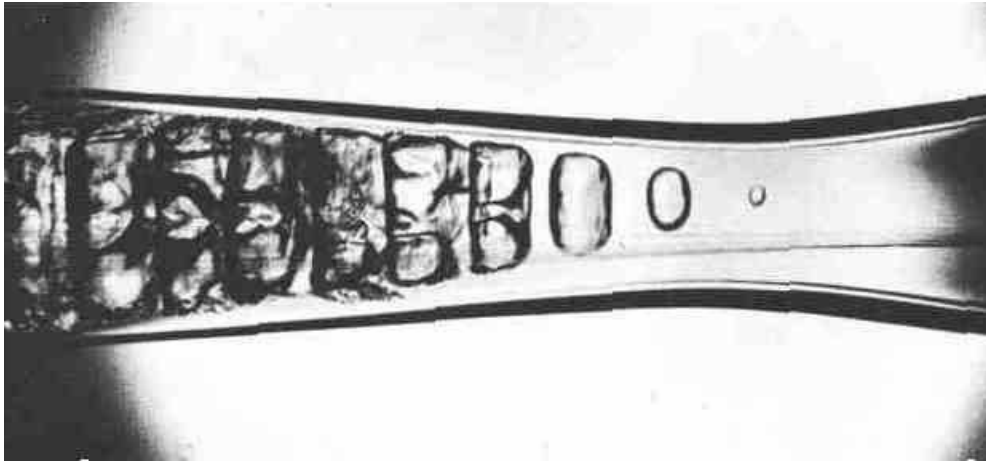


Рис. 3.1 – Кавітаційні бульбашки в трубі з місцевим звуженням

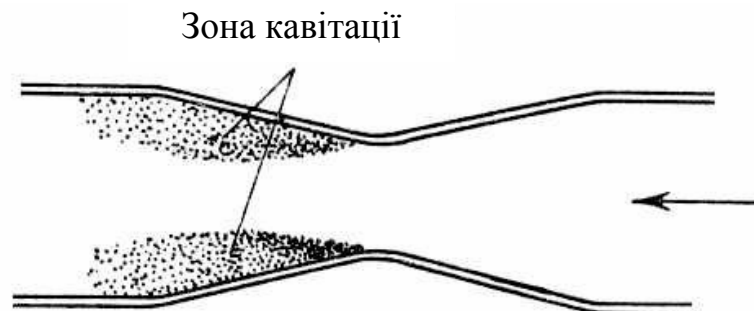


Рис. 3.2 – Зона кавітації в трубі з місцевим звуженням

Якби рідина була ідеально однорідною, а поверхня твердого тіла, з яким вона контактує, – ідеально змочуваною, розрив відбувся б за тиску, значно нижчому, аніж тиск насиченої пари рідини. Міцність на розрив води, обчислена при урахуванні теплових флуктуацій, дорівнює 150 МПа. Реальні рідини є менш міцними. Максимальне розтягнення очищеної води, досягнуте за 10 °С, становить 28 МПа. Зазвичай же розрив виникає за тисків, дещо менших тиску насиченої пари [6–8].

Низька міцність реальних рідин пов'язана з наявністю в них зародків кавітації: погано змочуваних ділянок твердого тіла, твердих частинок із тріщинами, заповненими газом, мікроскопічних газових бульбашок, огорнутих мономолекулярними органічними оболонками, іонних утворень, що виникають під дією космічних променів.

Кавітація виникає за визначеного для кожної точки потоку безрозмірного параметра

$$\chi = 2(P_{\infty} - P_{\text{н}})/(\rho V_{\infty}^2),$$

де P_{∞} – гідростатичний тиск потоку, що набігає; $P_{\text{н}}$ – тиск насиченої пари; ρ – густина рідини; V_{∞} – швидкість рідини на достатньому віддаленні від тіла.

Цей параметр, який називають «числом кавітації», є одним з чисел подібності при моделюванні гідродинамічних течій [6–8].

Збільшення швидкості потоку після початку кавітації викликає швидке зростання числа кавітаційних бульбашок, услід за чим відбувається їх об'єднання в загальну кавітаційну каверну. Потім течія переходить в струминну. При цьому течія зберігає нестационарний характер тільки в області замикання каверни. Особливо швидко струминна течія утворюється у разі погано обтічних тіл.

Якщо в каверну, крізь тіло, біля якого виникає кавітація, підвести атмосферне повітря чи інший газ, розміри каверни збільшуються. При цьому встановиться течія, яка відповідатиме числу кавітації, утвореному вже не за тиску насиченої водяної пари $P_{\text{н}}$, а за тиску газу в каверні $P_{\text{к}}$:

$$\chi = 2(P_{\infty} - P_{\text{к}})/(\rho V_{\infty}^2).$$

Спливання такої каверни кавітації визначатиметься числом Фруда:

$$\text{Fr} = V_{\infty} / \sqrt{gd},$$

де g – прискорення сили тяжіння; d – характерний лінійний розмір.

Оскільки $P_{\text{к}}$ може бути багато більше за $P_{\text{н}}$, то за таких умов можливо при малих швидкостях потоку, що набігає, отримувати течії, відповідні дуже низьким значенням, тобто глибоким мірам розвитку кавітації.

Так, при русі тіла у воді зі швидкістю 6...10 м/с можна отримати його обтікання, відповідне швидкостям до 100 м/с. Течії, що виникають унаслідок підведення газу в каверну, називають штучною кавітацією [6–8].

Гідродинамічна кавітація може супроводжуватися фізико-хімічними ефектами, наприклад іскроутворенням і люмінесценцією. У ряді робіт виявлено вплив електричного струму й магнітного поля на кавітацію, що виникає при обтіканні циліндра в гідродинамічній трубі [6–11].

Дослідження кавітації має велике значення, унаслідок її шкідливого впливу на гідротурбіни, насоси, гребні гвинти кораблів тощо.

Кавітацію можна зменшити, збільшуючи гідростатичний тиск, наприклад переміщуючи пристрій на достатній глибині відносно вільної поверхні рідини, а також вибираючи форму елементів конструкції.

Експериментальні дослідження кавітації здійснюють у кавітаційних трубах, що є звичайними гідродинамічними трубами, обладнаними системою регулюваннями статичного тиску.

Акустична (ультразвукова) кавітація

При випромінюванні в рідину звуку з певною амплітудою звукового тиску на зародках кавітації, якими найчастіше є газові включення в рідині і на поверхні акустичного випромінювача, під час півперіодів розрідження також виникають кавітаційні бульбашки [16–17].

Поріг кавітації зростає зі зменшенням умісту газу в рідині, збільшенням гідростатичного тиску, після обтискання рідини високим (100 МПа) гідростатичним тиском, охолодженні рідини, збільшенні частоти звуку й скороченні тривалості озвучування.

Поріг кавітації є вищим для рухомої хвилі. Бульбашки закриваються під час півперіодів стискання, створюючи короткочасні (близько 10^{-6} с) імпульси тиску (1000 МПа і більше), здатні зруйнувати навіть міцні матеріали. Таке руйнування спостерігається на поверхні потужних акустичних випромінювачів, що працюють у рідині.

Тиск при закритті кавітаційних бульбашок підвищується із зниженням частоти звуку й підвищенням гідростатичного тиску; він вищий у рідинах із невисоким тиском насиченої пари. Закриття бульбашок супроводжується адіабатичним нагріванням газу в бульбашках до температури близько 10^4 °С, що, мабуть, і спричинює явище світіння бульбашок при кавітації (звукolumінесценція). Кавітація супроводжується іонізацією газу в бульбашках [11–15].

Кавітаційні бульбашки групуються, утворюючи область кавітації складної мінливої форми. Інтенсивність кавітації зручно оцінювати за руйнуванням тонкої алюмінієвої фольги, в якій кавітаційні бульбашки пробивають отвори. За кількістю й розташуванням цих отворів, що виникають протягом установленого часу, можна оцінити інтенсивність кавітації та конфігурацію її області.

Якщо рідина насичена газом, газ дифундує в бульбашки й повного їх закриття не відбувається. Спливаючи, такі бульбашки виносять газ, зменшуючи його вміст у рідині. Інтенсивні коливання газонаповнених бульбашок у вільній рідині й поблизу поверхні твердих тіл створюють мікропотоки рідини.

Поява кавітації обмежує можливість подальшого підвищення інтенсивності звуку, випромінюваного в рідину, унаслідок зменшення її хвилевого опору з відповідним зменшенням навантаження на випромінювач.

Акустична кавітація і пов'язані з нею фізичні явища спричинюють ряд ефектів. Частина з них, наприклад руйнування й диспергування твердих тіл, емульгування рідин, очищення поверхонь деталей, виникають завдяки ударам від закриття бульбашок і мікропотокам поблизу них. Інші (наприклад, ініціація і прискорення хімічних реакцій) пов'язані з іонізацією газу в бульбашках. Завдяки цим ефектам акустичну кавітацію все ширше застосовують для створення нових і вдосконалення відомих технологічних процесів [11–15]. Велике коло застосувань ультразвуку базується саме на ефекті кавітації.

Акустична кавітація має велике значення в біології і медицині. Імпульси тиску, що виникають в кавітаційних бульбашках, обумовлюють миттєві розриви простих мікроорганізмів, що перебувають у водному середовищі [21].

Кавітацію використовують також для виділення з тварин і рослинних клітин ферментів, гормонів та інших біологічно активних речовин.

3.1.2 Застосування кавітаційних технологій для інтенсифікації виробництва біопалива

Вище було зазначено, що у фазі розрідження акустичної хвилі або за рахунок місцевого пониження тиску при обтіканні твердого тіла в рідині утворюються каверни (кавітаційні бульбашки), які заповнюються насиченою парою даної рідини.

У фазі стискання під дією підвищеного тиску і сил поверхневого натягнення каверна закривається, а пара конденсується на межі розділу фаз. Через стіни каверни в неї дифундує розчинений в рідині газ, який потім піддається сильному адіабатичному стисканню.

У момент руйнування каверни кавітації тиск і температура газу локально можуть досягти значних величин (за розрахунковими даними, до 100 МПа і 10000 К відповідно) [16]. Після руйнування каверни в навколишній рідині розповсюджується сферична ударна хвиля, швидко затухаюча у просторі.

При генеруванні імпульсної розтягувальної напруги в рідині присутні в ній зародки кавітації (стійкі парові і газові бульбашки малих розмірів) починають зростати, утворюючи кластер кавітації, форма і розміри якого визначаються початковим спектром розмірів зародків кавітацій, характером напруги, що прикладається, і граничними умовами.

У каверну кавітації можуть проникати пари рідини, розчинені гази, а також речовини з високою пружністю пари і не можуть проникати іони або молекули нелетких розчинених речовин. Енергію, що виділяється в процесі руйнування каверни, досить для збудження, іонізації і дисоціації молекул води, газів і речовин з високою пружністю пари усередині кавітаційної каверни.

Ерозія твердого тіла (руйнування поверхні), очищення поверхонь, диспергування твердих частинок, розчинення, екстрагування, емульгування гомогенізація, піноутворення здійснюються, в основному, за рахунок двох характерних проявів кавітації: ударних хвиль і кумулятивних цівок, що утворюються при руйнуванні кавітаційних бульбашок.

Кумулятивні цівки руйнують поверхневі шари і поверхню твердого тіла за рахунок кінетичної енергії рідини. Дрібні частинки твердого тіла, розміри яких сумірні з поперечним перетином кумулятивних струменів, захоплюються ними і дають додатковий внесок в процес руйнування поверхневих шарів і самих твердих частинок, що знаходяться в рідині.

У промисловості для дії кавітації на рідину використовуються гідродинамічні, електродинамічні, п'єзоелектричні, магнітострикційні і механічні генератори кавітації.

В ультразвуковому діапазоні поширення набули п'єзоелектричні й магнітострикційні генератори кавітації. У цих електроакустичних перетворювачах використовується прямий магнітострикційний і п'єзоелектричний ефект у змінних магнітних та електричних полях. Діапазон частот збудження перетворювачів є дуже широким (8...44 кГц і вище).

Ультразвукові коливання від перетворювача передаються до оброблюваних речовин через спеціальні трансформувальні узгоджувальні пристрої (концентратори, пластини і ін.), що закінчуються випромінюючою поверхнею [27, 38].

Принцип дії імпульсного електророзрядного випромінювача заснований на електрогідралічному ефекті, що полягає в генерації ударних хвиль в рідині при її пробі. Електричний розряд в рідині (електрогідралічний удар) спричинює складний комплекс явищ: іонізацію й розкладання молекул в плазмі каналу і біля нього, світлове випромінювання каналу розряду, ударні хвилі, інтенсивне ультразвукове випромінювання, світіння і пульсацію газового мішура, кавітацію, імпульсні магнітні поля [39–42].

У гідродинамічних кавітаторах типу роторних імпульсних апаратів, в основному, реалізується гідродинамічна і акустична дія в рідині за рахунок розвиненої турбулентності, пульсацій тиску і швидкості потоку рідини, інтенсивної кавітації, ударних хвиль і вторинних нелінійних акустичних ефектів [35–37, 43]. При обертанні ротора його канали періодично з'єднуються з каналами статора.

Швидкість потоку рідини в каналі статора є змінною величиною. При розповсюдженні в каналі статора імпульсу надмірного тиску услід за ним виникає короткочасний імпульс зниженого тиску, а інерційні сили створює розтягуювальна напруга в рідині, що викликає кавітацію.

У резонансних гідродинамічних генераторах використовується збудження коливань резонуючих елементів у вигляді пластин, стрижнів або мембран струменем рідини, що набігає [22]. Коливання резонуючих елементів створюють акустичне поле випромінювача.

Найбільш поширеною модифікацією таких випромінювачів є пластинчасті випромінювачі з консольним або двоточковим кріпленням вібруючої пластини. Струмінь, що витікає з великою швидкістю з конусно-циліндрового чи щілинного сопла, потрапляє на пластину з клиновидним краєм. При цьому відбувається зрив струменя і виникають вихорові пульсації і кавітація.

Аналогічний принцип перетворення кінетичної енергії струменя в енергію акустичних коливань використовують в багатострижневих гідродинамічних випромінювачах. Струмінь круглого перетину, що витікає з сопла, ударяється в лункоподібній відбивач і віялоподібно розходить,

потрапляючи на загострені виступи стрижнів, закріплених по циліндричній утворюючій паралельно осі сопла.

Відбувається збудження коливань стрижнів, які створюють в навколишньому середовищі потужне звукове поле. При використанні конусно-циліндричного сопла і відбивача з лункою, близькою формою до параболоїда обертання між торцями сопла і відбивача, формується пульсуюча область кавітації, що визначає параметри утворюваного акустичного поля.

Суперкавітуючі гідродинамічні пристрої за принципом роботи розподіляються на: динамічні – із робочими органами, що обертаються, в основному лопатевими; статичні – із нерухомими робочими органами; струменеві – із струменевими кавітаторами; комбіновані – що складаються з різних комбінацій перших трьох типів [10, 14]. Робочі органи таких апаратів встановлюються в спеціально спрофільованих проточних ділянках (наприклад, труба Вентурі).

Поєднання генераторів кавітацій різного типу може підсилити ефект кавітації. Сприятливо позначається генерування коливань з різними частотами, що відрізняються один від одного на порядок і вище [27].

Це обумовлено тим, що для збудження зародка кавітації певного радіусу необхідно генерувати коливання на певній частоті. Чим менше розміри зародків кавітації, тим вище має бути частота і тим більше має бути акустичний тиск, що викликає кавітацію.

Якщо генератори кавітації працюють на різних частотах і проходження рідини через них здійснюється послідовно, то рідина повинна спочатку проходити через генератор з більшою частотою, а потім через генератор з меншою частотою.

У генераторі з високою частотою збуджуються зародки кавітації найменшого розміру, які швидко збільшуються. Ці бульбашки кавітацій служать зародками кавітації в генераторі з низькою частотою і збільшуються у розмірі ще більше, що приводить до збільшення імпульсів тиску кавітації.

Дія кавітації на рідину дозволяє отримувати високоякісні технологічні, харчові і біологічно активні розчини екстрактів, емульсії і суспензії [10, 14, 22-25, 35–38, 43–47].

До таких систем належать овочеві й фруктові соки, пюре, пасти, майонез, гомогенізоване й відновлене молоко, йогурти, мазі, креми, біологічно активні речовини (пектин, танін, амінокислоти, витяжки й екстракти), водо-паливні емульсії і суспензії, лаки й фарби тощо.

Кавітацію застосовують для гомогенізації і пастеризації молока. Дія кавітації не тільки підвищує дисперсність емульсії, але й знищує шкідливі мікроорганізми. При обробці молока при температурі 70 °С загальне мікробне число знижується в 103...105 разів.

При цьому відбувається повне знищення вегетативних форм дріжджів і цвілі, а також патогенних мікроорганізмів групи кишкової палички і нейтралізація фосфатази.

Таке оброблення дозволяє збільшити термін зберігання молока при температурі 9...12 °С у септичній упаковці до 5 діб без ознак скисання.

Дія кавітації ефективно використовується для інтенсифікації процесів розчинення і екстрагування, наприклад, пектину, каротину, таніну і інших цінних речовин з біомаси. Кавітація змінює властивості водних розчинів і гідрогелів полісахаридів: крохмалю, амілопектину, альгінату натрію, хітозану, натрієвої солі карбоксиметилцелюлози тощо [10, 14, 22-25, 35-38, 43-47].

Багато лікарських речовин отримують методами екстрагування сировини рослинного і тваринного походження. Застосування кавітаційних технологій дозволяє підвищити якість м'яких лікарських форм суспензійного та емульсійного типів [43].

Перспективним напрямом в енергетиці є використання дисперсійно-паливних систем [10, 14]. Кавітація є ефективним засобом для одержання водо-вугільних суспензій і вугільно-мастильних паст.

Використання якісних вугле-мазутних суспензій дозволяє зменшити витрату мазуту на 20...25 %. Спалювання вугле-мазутних і водо-вугільних суспензій дозволяє знизити шкідливі викиди (CO_x , NO_x), утилізувати вугільний шлак, знизити собівартість теплової й електричної енергії [48].

У високов'язкому мазуті міститься вода у вигляді окремих місцевих скупчень. Використання як палива спеціально приготовлених водо-мазутних емульсій є одним з ефективних методів, що дозволяють вирішити цю проблему [36, 48-53]. При спалюванні водо-мазутних емульсій отримують істотний економічний ефект, підвищення коефіцієнта корисної дії на 3...5 % і зменшення емісії забрудників (CO , сажі, оксидів азоту, бенз(а)пірену, канцерогенних поліциклічних ароматичних вуглеводнів).

Обробка кавітацією водо-мазутної емульсії з додаванням кальцію та подальшим спалюванням дозволяє зменшити концентрацію оксидів азоту в димових газах у 2...5 раз, концентрацію сірчистого ангідриду – у 2...3 раз, оксиду вуглецю – у 2,0...2,5 раз.

Відбуваються глибокі структурні зміни в молекулярному складі вуглеводнів, збільшується дисперсність асфальтенів, карбонів до розмірного ряду 2...3 мкм. Довгі молекулярні ланцюги перетворюються на легкі вуглеводневі радикали газових і дистильованих фракцій.

Найбільший економічний ефект і одночасне зниження газових викидів забезпечує додавання в паливо 10...15 % води, а найбільший екологічний ефект в частині утилізації забруднених органічними продуктами вод реалізується при рівні водної фази до 50 %.

Забезпечується можливість спалювання некондиційного високов'язкого та обводненого мазуту. Як водна фаза можна використовувати забруднені промислові стоки підприємств.

Дія кавітації на нафту і нафтопродукти дозволяє збільшити вихід легколетких фракцій за атмосферної перегонки [54-60]. Застосовуючи ка-

вітацію, із важкої нафти можна отримати 20...30 % бензину, 40...50 % дизельного палива, 20...30 % мазуту, бітуму та інших товарних продуктів.

Кавітація прискорює дифузію нафти в порожнині парафіну, інтенсифікує процес його руйнування. Прискорення розчинення парафіну йде за рахунок інтенсифікації перемішування нафти на межі нафта–парафин і дії імпульсів тиску, які розбризкують частинки парафіну. Кавітація розриває безперервний ланцюжок, руйнуючи зв'язки між окремими частинами молекул, впливає на зміну структурній в'язкості, тобто на тимчасовий розрив ван-дер-ваальсових зв'язків.

Під впливом кавітації великої інтенсивності впродовж тривалого часу порушуються С–С-зв'язки в молекулах парафіну, унаслідок чого відбуваються зміни фізико-хімічного складу (зменшення молекулярної ваги, температури кристалізації і ін.) і властивостей нафтопродуктів (в'язкість, густина, температура спалаху тощо).

Під час імпульсного кавітаційного оброблення нафти й нафтопродуктів енергія, що виділяється при руйнуванні кавітаційних бульбашок, використовується для розриву хімічних зв'язків між атомами великих вуглеводневих молекул.

Енергія дисоціації зв'язку С–Н залежно від молекулярної маси й структури молекули коливається в межах 322...435 кДж/моль, зв'язку С–С – 250...348 кДж/моль. При розриві зв'язку С–Н від вуглеводневої молекули відривається водень, а при розриві зв'язку С–С вуглеводнева молекула розривається на дві нерівні частини.

При кавітаційній обробці вуглеводневої сировини відбувається деструкція молекул, викликана мікрокрекінгом молекул і процесами іонізації. Унаслідок цього в системі накопичуються «активовані» частинки: радикали, іони, іонно-радикальні утворення [59, 60].

Дія кавітації на мазут дозволяє знизити в'язкість на 20...30 %, підвищити температуру спалаху на 5...10 %. Після кавітації в мазуті утворюється до 35 % дизельного палива (температура відгону 250...290 °С).

Експериментальні дослідження свідчать, що за атмосферного тиску для нафти, обробленої в кавітаційному генераторі, температура початку перегонки на 10...15 °С нижче, аніж для необробленої нафти, а 50 % конденсату утворюється за температури 328 °С, що на 63 °С нижче, аніж для необробленої [54, 55].

Експериментальні дослідження імпульсної кавітації рапсової й соняшникової олії засвідчили, що оброблені олії мають відмінні від початкової олії фізико-хімічні характеристики, зокрема поділяються на фракції різної леткості з великим відсотком виходу, відрізняються від початкових продуктів меншою в'язкістю, підвищеною температурою спалаху.

Сьогодні кавітаційні технології активно застосовують для виробництва біодизеля з олій і жирів. Обробка кавітацією олій, жирів і метанолу (етанолу) дозволяє підвищити якість отриманого продукту, прискорити технологічний процес і знизити температуру його реалізації [61].

Теплогенератори на базі кавітаційного устаткування – це нове покоління машин, що перетворюють механічну і акустичну дії на рідину в теплоту. Нагрівання здійснюється при перетворенні кінетичної енергії рідини в теплову енергію за рахунок ефектів кавітації і вихрових [62, 63].

Генератори кавітацій можуть також використовуватися для процесу очищення від накипу, різних відкладень і забруднень на внутрішніх поверхнях і в важкодоступних місцях устаткування й трубопроводів.

Обробка кавітацією води змінює її фізико-хімічні властивості, збільшує рН води, сприяє її активації. В результаті дії кавітації вода тимчасово стає активним розчинником важкорозчинних речовин без введення хімічних реагентів [32–35, 44].

Однією з проблем при отриманні силікатно-масляних мастил є приготування складу з високою стабільністю. Використання обробки кавітації для одержання силікатного мастила для механізмів редукторів показало його високу ефективність. Використання кавітації для одержання змащувально-охолоджуючих рідин сприяє підвищенню їх якості, а також знижує енерговитрати в процесі їх виробництва.

Розмір частинок дисперсної фази отримуваних змащувально-охолоджуючих рідин досягає 1 мкм, що дозволяє зменшити витрату ріжучого інструменту, підвищити якість обробки поверхні, зменшити корозію верстатного устаткування [35].

Цементно-водна суспензія, піддана обробці кавітації і додана в бетонну суміш, підвищує міцність на стиснення і розтягування виробів з бетону. Використання кавітації для одержання стійких і високодисперсних емульсій і паст, що вводяться в бетон, дозволяє збільшити міцність бетону на 15...20 % [35].

Для одержання залізобетону з високими експлуатаційними властивостями для будівельних, морських і інших споруд проводять хімізацію бетону комплексними добавками. Як комплексні добавки застосовують колоїдну парафінову пасту. Вона є комплексним поєднанням двох різних за хімічною природою речовин – води (полярного розчинника) і парафіну (неполярною гідрофобною речовиною). Для утворення стійкої системи парафін–вода необхідна інтенсивна обробка, яка досягається при дії кавітації.

Після обробки парафінову пасту вводять в бетономішалку разом з іншими компонентами. При температурі близько 60 °С частинки парафіну переходять у в'язко-текучий стан, заповнюючи капіляри і пори бетону. При охолодженні бетону парафін повертається в первинний стан, додаючи бетону водостійкість.

Об'ємна гідрофобізація бетону частинками парафіну знижує водопоглинання на 40...50 %, підвищує його корозійну стійкість і довговічність в умовах дії рідких агресивних середовищ [35].

Можна і далі наводити приклади ефективності дії кавітації на оброблювані рідини. Сфери застосування кавітації в різних технологічних про-

цесах дуже широкі. Усе це стає можливим завдяки концентрації енергії в просторі і в часі [64].

3.2 Напрями вдосконалення базових технологій виробництва біодизельного палива

Напрямки вдосконалення базових технологій виробництва біодизельного палива умовно поділяють на такі [65-66]:

- удосконалення та підвищення якості вихідної сировини (інгредієнтів) для виробництва біопалива;
- вибір ефективних методів інтенсифікації виробництва біопалива;
- удосконалення технічних засобів для реалізації ефективних технологій виробництва біопалива.

Що стосується *першого напрямку*, то тут можна навести типовий базовий спосіб одержання біопалива, який, зазвичай, містить змішування рослинної олії, розчинника та каталізатора. Варіанти вдосконалення базового способу полягають, наприклад, у тому, що спочатку змішують рослинну олію та розчинник, а потім до одержаної суміші додають каталізатор, причому як розчинник використовують газовий конденсат, а як каталізатор – п'ятивідсотковий розчин етилату натрію в етиловому спирті, у певному співвідношенні компонентів [67, 68].

Другий напрям репрезентують, зокрема, кавітаційні методи (як гідродинамічні, так і ультразвукові).

Так, наприклад, відомий спосіб одержання ефірів жирних кислот ріпакової олії [69], який полягає в рафінуванні олії сірчаною кислотою та розчином лугу, її відокремленні від суміші з подальшою відгонкою води, приготуванні розчину каталізатора в органічному розчиннику, етерифікації рафінованої олії при перемішуванні, видаленні залишків каталізатора та осушуванні ефірів.

При цьому при етерифікації оброблювана олія при перемішуванні піддається локалізованому гідродинамічному кавітаційному впливу з кратністю не менше двох, а видалення залишків каталізатора та осушування ефірів здійснюють відцентровим сепаруванням під вакуумом при тиску до 9 кПа. При рафінуванні олії сірчану кислоту й розчин лугу подають безпосередньо в локалізовану зону кавітаційного впливу на оброблювану суміш.

Унаслідок кавітації в потоці генерується вакуумна кавітаційна каверна, яка в подальшому розпадається і утворює локалізоване бульбашкове кавітаційне поле за всім перерізом технологічного потоку. При цьому об'ємна концентрація кавітаційних бульбашок становить до 10^{10} м^{-3} . При руйнуванні кожної бульбашки утворюються локальні тиски до 10^3 МПа , а температура, що оточує бульбашку, підвищується на $500 \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$ [70].

Такі високі тиски за великої питомої концентрації бульбашок сприяють тому, що питома потужність впливу на оброблюване середовище становить $10^4 \dots 10^5 \text{ кВт/м}^3$. Унаслідок цього створюються умови для протікан-

ню гідромеханічних, фізичних та хімічних процесів, які за звичайних умов ускладнені або неможливі [11].

Кавітаційна дія сприяє зміні молекулярної конфігурації ефірі в рослинних оливах та утворенню нових органічних сполук, які практично повністю відповідають властивостям та експлуатаційним характеристикам традиційних палив.

Крім того, завдяки розвиненій міжфазовій поверхні, яка утворюється при кавітаційному впливі на суміш компонентів, в декілька разів прискорюються реакції масообміну, що дозволяє підвищити швидкість хімічних реакцій на всіх операціях реалізації способу і підвищити їх глибину.

Принаймні подвійний кавітаційний вплив в локалізованій зоні обумовлений необхідністю гарантування залучення до реакцій масообміну всіх компонентів оброблюваної суміші, скорочення тривалості етерифікації. Цьому сприяє також безпосередня подача сірчаної кислоти та розчину луку в локалізовану зону кавітаційного впливу [71].

У лінії для виробництва біодизельного палива [72] для інтенсифікації процесу верхню частину реактора сполучають з гідродинамічним ультразвуковим випромінювачем, що генерує у рідину ультразвукові коливання, інтенсифікуючи тим самим вищеозначені процеси.

Інша модульна біодизельна установка [73] складається з ємностей для олії, метанолу та реактора, приєднаних своїми випускними трубопроводами через відповідні електроклапани до впускного колектора головного циркуляційного насоса, напірний трубопровід якого розгалужений через окремі електроклапани на паралельні лінії теплообмінника, кавітаційної камери та прямого каналу, з'єднаних далі з впускними трубопроводами реактора та відстійника, всередині відстійника встановлені ультразвукові випромінювачі.

При цьому на випускному трубопроводі ємності для метанолу встановлений змішувальний насос, напірний трубопровід якого приєднаний до неї в місці подачі лужного каталізатора, всередині ємності для метанолу встановлюють ультразвукові випромінювачі та дозувальний пристрій, що також сприяє інтенсифікації ряду вищеозначених процесів.

Третій напрям, а саме удосконалення технічних засобів для реалізації ефективних технологій виробництва біопалива, представлений широким спектром високоефективного технологічного обладнання.

Окрім [72, 73], слід виділити установку для стабілізації суміші вуглеводнів, яка містить кавітаційний реактор з установленим на його вході насосом, а на виході - ємністю для стабілізованої суміші вуглеводнів і газу дегазації з патрубками відведення рідкої та газової фаз суміші [74].

Установка для стабілізації суміші вуглеводнів (рис.3.3) працює таким чином. Суміш вуглеводнів за допомогою насоса 2 подають на оброблення в кавітаційний реактор 3. У реакторі 3, внаслідок штучно створених умов течії потоку, генерується гідродинамічна кавітація. За джерелом кавітації виникає приєднана вакуумна порожнина (каверна).

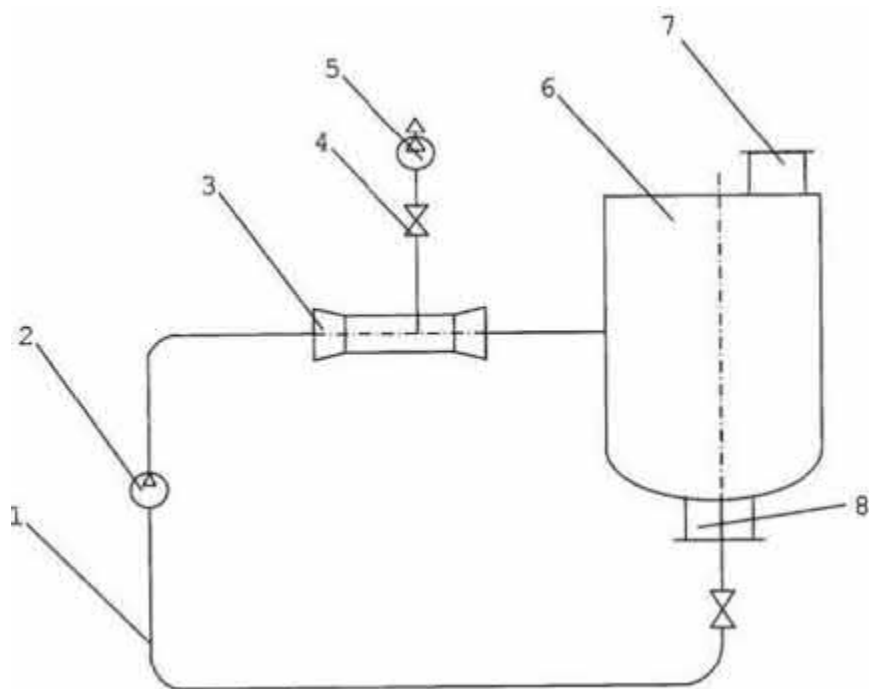


Рис. 3.3 – Установка для стабілізації суміші вуглеводнів

При різниці тисків і спрямованій дифузії в каверну надходять легкокиплячі газоподібні компоненти оброблюваного середовища, які відводяться через сполучений з реактором 3 додатковий патрубок 4, який, в свою чергу, з'єднаний з пристроєм 5 для відведення газової фази, наприклад, вакуум-насосом.

Унаслідок фізико-механічного впливу кавітації на компоненти суміші вуглеводнів з різними температурами кипіння, відбувається інтенсифікація хімічних реакцій між ними. Проміжними і кінцевими продуктами цих реакцій є газоподібні сполуки, що потребують вилучення. Отже, одноразової кавітаційної дії на оброблювану суміш може бути недостатньо.

Для забезпечення багаторазової дії на середовище патрубок відведення рідкої фази суміші 8 приєднаний до входу насоса 2 з утворенням циркуляційного контуру 1. Інтенсивність кавітаційної дії на суміш додатково регулюється кратністю оброблення в реакторі 3. Залишкова газова фаза може відводитися з ємкості для стабілізованої суміші 6 через патрубок 7.

Застосування запропонованої установки дозволяє підвищити ефективність вилучення легкокиплячих компонентів суміші і, таким чином, покращити процес її стабілізації, що дозволяє розширити технічні можливості запропонованого технічного рішення.

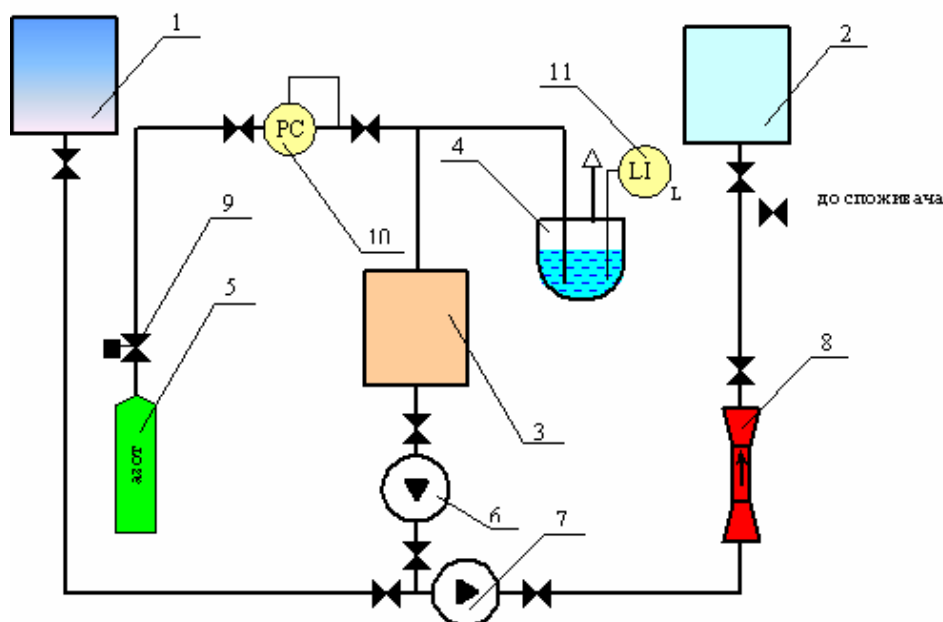
Ще одним яскравим прикладом цього напрямку є технологія та реалізуюча її установка для приготування біопалива (рис. 3.4) з одночасним азотуванням для тривалого зберігання [75]. Біопаливо, що готується, є сумішшю, що містить 80 % дизельного палива і 20 % рапсової олії.

При тривалому зберіганні біопалива у відкритих резервуарах відбувається його окислення, що негативно позначається на якісних характеристиках палива в цілому. Для вирішення цієї проблеми готовий продукт збе-

рігають під невеликим надлишковим тиском азоту (200 мм. вод. ст.) – «азотною подушкою».

Для зниження експлуатаційних витрат при тривалому зберіганні горючих рідин (ГР) і легкозаймистих рідин (ЛЗР), таких як дизельне біопаливо, пропонується використовувати схему зберігання під «азотною подушкою» тільки рапсової олії, яка не належить до ГР і ЛЗР.

За цією технологією біопаливо готують за потребою. На склад завозять необхідну кількість дизельного палива, яку заливають у приймальний резервуар 1. Із сховища 3 насосом 6 рапсову олію подають на насос 7, який перекачує дизельне паливо з приймального резервуара 1. За допомогою гідродинамічного кавітаційного змішувача 8 здійснюють приготування біопалива, яке подають в ємність готового продукту 2 або спрямовують споживачеві.



- 1 – приймальний резервуар дизельного палива; 2 – ємність готового продукту;
 3 – резервуар для олії; 4 – гідравлічна засувка; 5 – балон із стисненим азотом;
 6 – насос для перекачування олії; 7 – насос контуру приготування дизельного біопалива; 8 – гідродинамічний кавітаційний змішувач; 9 – газовий редуктор;
 10 – регулятор прямої дії; 11 – рівнемір гідравлічної засувки

Рис. 3.4 – Принципова технологічна схема приготування і зберігання паливної суміші дизельне паливо–рапсова олія

Типовим прикладом технічних засобів третього напрямку можна також навести типову установку для виготовлення біодизельного пального [76]. Установка для виготовлення біодизельного пального (рис. 3.5) складається з технологічних ємностей для олії 1, метанолу 2, луку 3, метоксиду 4, гліцерину 5 і біодизельного пального 6, бака-відстійника 7, насоса 8 із привідним електродвигуном, з'єднаного з частотним перетворювачем, реактора 9, арматури – кранів 10-25, манометра 26 і термометра 27, а також

іншої контрольно-вимірювальної та регулювальної апаратури й технологічних трубопроводів. У трубопроводі, що з'єднує насос 8 із реактором 9, встановлено імпульсний клапан 28, на виході якого закріплені ежектори-форсунки 29 із відбійними площадками 30. Окрім того, у нижній частині реактора розташовані турбінні змішувачі 31.

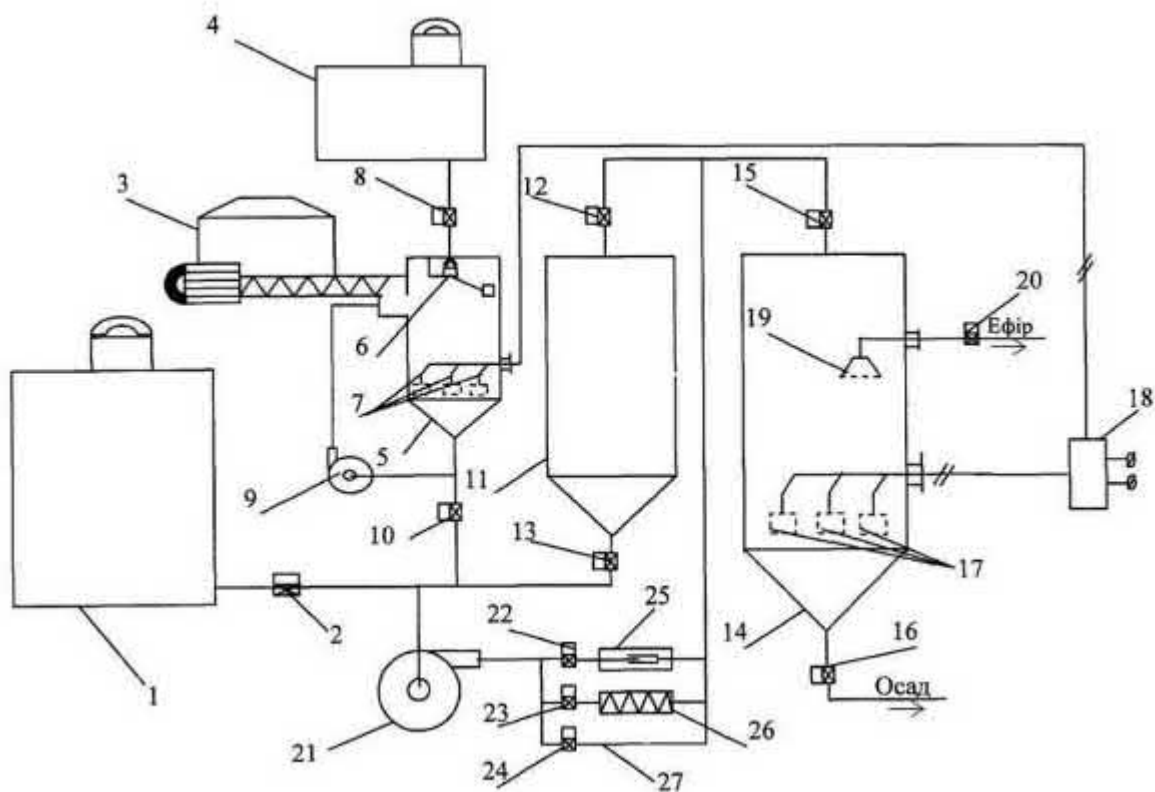


Рис.3.5 – Принципова схема установки для виготовлення біодизельного палива

Установка для виготовлення біодизельного палива працює таким чином. При включенні приводного електродвигуна з частотним перетворювачем, у разі налаштування на режим початкового заповнення реактора 9, насос 8 усмоктує суміш олії з компонентами каталізатора – метоксиду (суміші метанолу й луку) і спрямовує її із резервуарів для олії 1 і метоксиду 4 у реактор 9. Після заповнення реактора 9 необхідною кількістю суміші, крани 17 і 25 перекривають, а кран 16 відкривають, і насос 8 починає працювати у імпульсному рециркуляційному режимі. Через наявність у нагнітальній магістралі імпульсного клапана 28 відбувається періодичне імпульсне «подрібнення» суміші у реакторі 9. Струмені суміші, які викидаються із ежекторів-форсунок 29, ударяються о відбійні площадки 30 і, унаслідок тривалого періоду імпульсної подачі суміші, відбувається її інтенсивне перемішування і нагрівання, що також додатково підсилюється механічним перемішуванням за допомогою турбінних змішувачів 31, розташованих у нижній частині реактора 9.

Завдяки імпульсній інтенсифікації технологічного процесу переетерифікація олії з утворенням біодизельного палива й гліцерину прискорюється. Окрім того, застосований для керування частотою обертання елект-

родвигуна і з'єднаного з ним насоса 8, частотний перетворювач сприяє вибору оптимального режиму переетерифікації.

Одержану суміш насосом 8 перекачують у бак-відстійник 7, де вона розшаровується на гліцерин і біодизельне паливо. Після цього готовий продукт зливають у резервуар 5.

Таким чином, при виробництві біодизеля саме низька швидкість реакцій і слабкий масообмін знижують потужність використовуваної біодизельної установки, а також кількість і якість отриманого біопалива [76].

3.3 Аналіз деяких дослідно-промислових технічних засобів для виробництва біодизельного палива

Нижче розглянуто деякі ефективні вітчизняні й зарубіжні (переважно російські) дослідно-промислові технічні засоби для виробництва біодизельного палива.

3.3.1 Вітчизняні дослідно-промислові технічні засоби

Як було зазначено у розділі 2, європейські країни успішно організують виробництво біодизельного палива (БДП) для тракторної техніки та автомобілів [1–5]. Принцип виробництва БДП – переетерифікація рапсового масла з метанолом чи етанолом у присутності каталізатору. Результатом переетерифікації є активована суміш біодизельного палива, гліцерину та інших компонентів. Зазвичай, виробництво олії та одержання біодизеля поєднують.

Методика досліджень

Покладаючись на закордонний досвід [77] і розробки [78, 79] розроблено універсальну гідродинамічну установку для виробництва БДП в умовах агропромислового виробництва диспергуванням на молекулярному рівні рапсової олії з етанолом в присутності каталізатору (наприклад, гідроксиду натрію). Принципову схему установки, її загальний вигляд і робочі елементи наведено на рис. 3.6–3.9.

Установка складається з технологічної ємкості 1 для сировини (рапсова олія) і гідростанції, що складається з електродвигуна 3, муфти 4, насоса 5, байпаса 6 і вентилятора 7 для регулювання тиску олії в системі. Байпас 6 магістраллю 8 через кран 9 сполучено із дозатором-змішувачем 10 інжекторного типу й гідродинамічним диспергатором 19.

Дозатор-змішувач 10 і диспергатор 19 встановлені послідовно, при чому вихід дозатора з'єднаний із виходом диспергатора. Дозатор-змішувач 10 має порожнину розрідження Р між соплом 11 і розширювачем 12, розташованим у його корпусі.

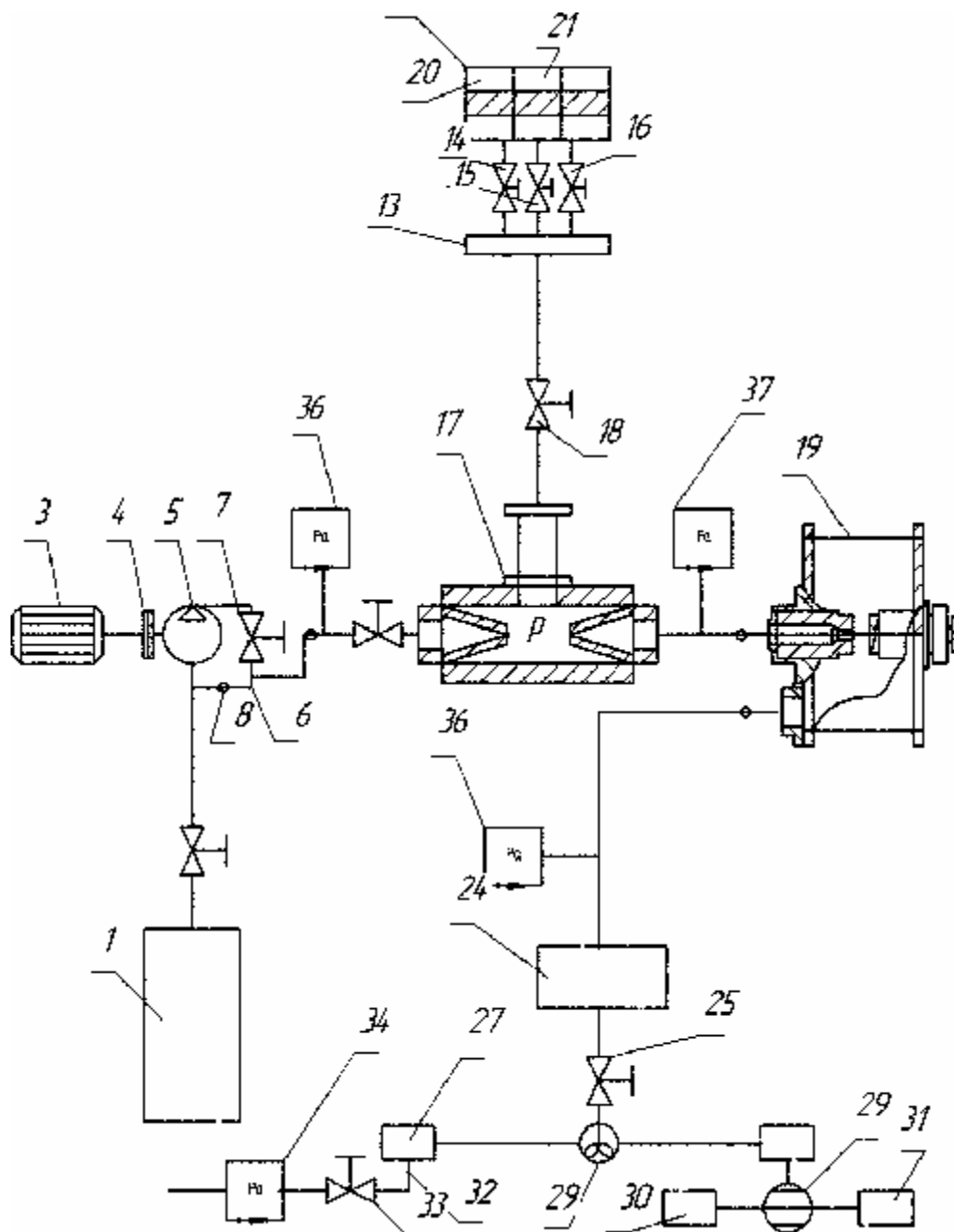


Рис. 3.6 – Універсальна установка для виробництва біодизельного палива

Порожнину розрідження дозатора трубопроводом 17 сполучено з колектором 13. Колектор 13 з'єднаний арматурою через крани 14, 15 і 16 з внутрішніми порожнинами бака 35, що має три секції. Секція 20 призначена для дизельного палива, 21 – для метанолу, 22 – для каталізатору (гідроксид натрію). Вихід дозатора 10 з'єднаний із виходом гідродинамічного диспергатора 19.

Одночасно вихід із диспергатора трубопроводом з'єднаний із технологічною ємкістю 24, для гідродинамічної активації суміші рапсової олії з компонентами, що надходять із секцій 20, 21 і 22 крізь колектор 13 і дозатор-змішувач 10. Резервуар 24 краном 25 з'єднано з сепаратором 26 для розділення біодизеля й водно-гліцеринової суміші, що надходять відповідно в резервуари 27 і 28. Резервуар 24 оснащено дренажним трубопроводом

32 із краном 33 для видачі готової продукції. Резервуар 28 сполучено з фільтром 29, який, у свою чергу, з'єднаний з резервуаром 30 для гліцерину і 31 – для води. Установку обладнано манометром 36, датчиком температури 37, і витратоміром біодизеля 34.



Рис. 3.7 – Загальний вигляд установки для виробництва біодизельного палива



Рис. 3.8 – Робочий елемент установки для виробництва біодизельного палива

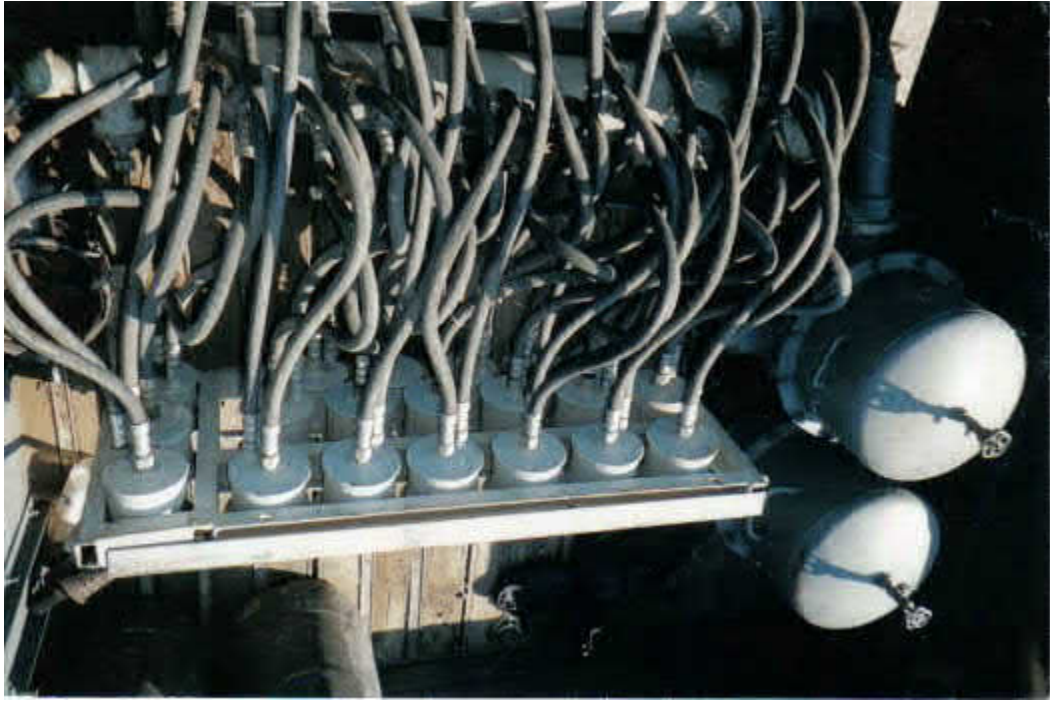


Рис. 3.9 – Вузол комутації установки для виробництва біодизельного палива

Установка конструктивно виконана блочно-модульною, є універсальною й може працювати в трьох режимах, а саме одержання біодизельного палива:

- диспергуванням холодно-пресованої очищеної рапсової олії, дизельного палива нафтового походження й метанолу за наявності каталізатору.
- із чистого метилового ефіру з динамічно активізованої суміші рапсової олії й метанолу, оброблених каталізатором.
- із суміші дизельного палива й рапсової олії диспергуванням компонентів на молекулярному рівні.

У першому режимі крани 14–16 відкриті для надходження в дозатор-змішувач 10 усіх компонентів. Після вмикання приводного електродвигуна 3 через муфту 4 починає працювати гідронасос 5, який всмоктує олію з ємкості 1 в байпас 6 і напірну магістраль 8 установки. Після цього краном 6 байпаса встановлюють робочий тиск у магістралі 8, який контролюють манометром 36. Рапсова олія під тиском надходить напірною магістраллю 8 при відкритому крані 9 і потрапляє в дозатор-змішувач 10. Одночасно при відкритих кранах 14–16 із секцій 20–22 у колектор 13 надходять компоненти, які змішуються і всмоктуються через кран 18 і трубопровід 17 в порожнину розрідження дозатора 10, де рапсова олія насичується компонентами суміші. Попередньо насичена суміш надходить у гідродинамічний кавітатор 19, де відбувається глибоке диспергування суміші компонентів на молекулярному рівні. Активована суміш надходить трубопроводом 23 у технологічну ємкість 24, а потім у сепаратор 26 при відкритому крані 25. У сепараторі 26, суміш розшаровується на біодизель і водно-гліцеринову суміш, які спрямовують у відповідні ємкості 27 і 28. Далі водно-гліцеринову

суміш подають на фільтр 29, де з неї вилучають воду. Гліцерин зливають у ємкість 30, а воду – у 31. Готовий продукт з ємкості 27 трубопроводом 32 при відкритому крані 33 через витратомір 34 видають споживачеві.

У другому режимі установка працює при закритому крані 14 і відкритих кранах 15 і 16 для надходження метанолу й каталізатору в порожнину розрідження дозатора-змішувача 10. У третьому режимі установка працює при закритих кранах 15-16 і відкритому крані 14 для надходження дизельного палива у порожнину розрідження дозатора-змішувача 10. Подальші процеси є аналогічними роботі установки в першому режимі.

Результати досліджень

Установку апробовано. При цьому встановлено (табл. 3.1):

– одержаний біодизель за своїми фізико-експлуатаційними властивостями майже не відрізняється від дизельного палива нафтового походження (табл. 3.1);

– працездатність дизелів майже не змінюється навіть без модернізації вузлів та агрегатів;

– робота дизельних двигунів на біодизельному паливі є більш екологічно безпечною;

– велика продуктивність установки за біодизелем (1100 л/год), простота конструкції й невеликі габарити дозволяють використовувати її для забезпечення паливом фермерських господарств.

Таблиця 3.1 – Порівняння одержаного біодизельного й традиційного палива

Паливо	Показники			
	Цетанове число	Кінематична в'язкість при 20 °С, мм ² /с	Температура спалаху, °С	Густина при 20 °С, кг/м ³
Біодизельне з рапсової олії	40	7,83	52	848
Нафтове дизельне	50	6,0	40	860

3.3.2 Зарубіжні дослідно-промислові технічні засоби

У цьому підрозділі розглянуто деякі зарубіжні дослідно-промислові технічні засоби для виробництва біодизельного палива, а саме установку для одержання водо-паливних емульсій і біодизельного палива [80] і вдосконалену технологію виробництва солярки зі спирту [81].

Установка для одержання водо-паливних емульсій і біодизельного палива

Для стійкого спалювання рідкого палива в котельних, а також одержання водо-паливних емульсій для автомобільного транспорту потрібна якісна підготовка нафтопродуктів. Підготовка нафтопродуктів може проводитися на стаціонарних установках кавітаційної переробки (рис. 3.10).



Рис. 3.10 – Установа для одержання водо-паливних емульсій і біодизельного палива [80]

Система одержання водо-паливних емульсій (біодизельного палива) побудована на використанні вихорових кавітаційних модифікаторів палива камерного типу. Пропонована технологія побудована на дослідженнях та експериментальній перевірці теоретично обґрунтованих результатів.

Схему одержання водо-паливних емульсій і біодизельного палива побудовано з основної ємкості з вбудованими вихоровим занурюваним нагрівником (модифікатором) кавітації (рис. 3.11, *а*) і шнековою мішалкою (рис. 3.11, *б*), додаткової ємкості для води (хімічного реагенту) з ежектором та олійного насоса, увімкненого за оборотною схемою (рис. 3.11, *в*).

Конструкції установки є різними залежно від технологічних завдань і продуктивності. При відпрацюванні режимів переробки трансформаторного масла та одержанні масляно-водяної суміші, було звернено увагу на змінення фізичних властивостей оброблюваної суміші: зменшення в'язкості, збільшення текучості, інтенсивне нагрівання. Ці зміни покращують спалювання, зменшують витрату палива для одержання одиниці теплової енергії.

Для перероблення нафтопродуктів (мазуту, дизельного палива тощо) виконують обв'язку до насосів НМШ5-25-4,0/25-1, НМШ8-25-6,3/25-1.



а – вбудований занурений нагрівник кавітації (модифікатор); *б* – додаткова ємкість із олійним насосом та обв'язкою; *в* – шнекова мішалка

Рис. 3.11 – Загальний вид установки для одержання водо-паливних емульсій і біодизельного палива [80]

Удосконалена технологія виробництва палива з етанолу

Більшість технологій виробництва біопалива сьогодні засновані на переробці сировини олійних культур, зокрема рапсу. Але для Росії й України актуальнішим є паливо з етилового спирту.

Вартість етанолу становить приблизно 3750 грн/т. З урахуванням відміни акцизного збору, переходу виробництва етилового спирту на дешеву сировину (мелясу), зростання вартості метанолу можливе зниження вартості біодизеля з етилових ефірів в 1,86...2,05 рази порівняно з метиловим ефіром.

Синтез ефірів з етилового спирту, що містить воду, є неможливим. Для вирішення проблеми запропоновано каталізатор, що дає можливість використовувати спирт-ректифікат (93,8 % етанолу).

Синтез біодизеля здійснюють, зазвичай, у стандартних реакторах з мішалкою й підігрівом. Пропонується новий тип реактора, який прискорює переетерифікацію в 5...6 разів [81]. При цьому енерговитрати знижуються на 25 %. Упровадження нового реактора не змінює технологічну схему.

Етиловий біодизель за своїми паливно-енергетичними показниками майже не поступається метиловому, але обидва дещо поступаються нафтовому дизельному паливу. Проект потребує розробки технології інтенсифікації спалювання біодизеля в паливній системі автомобіля.

Найбільш ефективним процесом інтенсифікації горіння є електрокаталітичне спалювання. Ці розробки дають можливість збільшити потужність дизельного двигуна і довести показники роботи його на біодизелі до рівня, що він має при роботі на нафтовому паливі.

Запропонована технологія не змінює конструкцію двигуна. Вона сто- сується лише технології подачі повітря і палива.



посудина для контролю синтезу



робочий елемент реактора

Рис. 3.12 – Елементи реактора синтезу

Дослідження здійснювали в двох напрямках: перший - дослідження синтезу нових типів каталізаторів, що дозволяє отримувати біодизель з етилового спирту з таким же виходом, тієї ж якості й за таких же умов, як і для метилового біодизеля; другий - дослідження впливу явища кавітації на швидкість процесу синтезу [80].

Синтез біодизеля відбувається в процесі реакції переетерифікації у присутності кислотного чи лужного каталізатора. Зазвичай, використовують лужні каталізатори (KOH чи NaOH), оскільки вони сприяють меншій витраті енергії. Під час синтезу біодизеля з використанням лужного каталізатора відбувається побічна реакція омилення олії. При цьому кількість каталізатора зменшується.

Досліджений процес синтезу з використанням нового каталізатора дозволяє провести процес переетерифікації олії з етанолом майже без омилення і з високим ступенем перетворення (98 %; на каталізаторі KOH – 75...80 %).

Визначено оптимальну кількість етанолу для переетерифікації з найбільшим виходом продукції й мінімальними витратами спирту – 21 ± 1 дм³ на 100 дм³ олії (рис. 3.13).

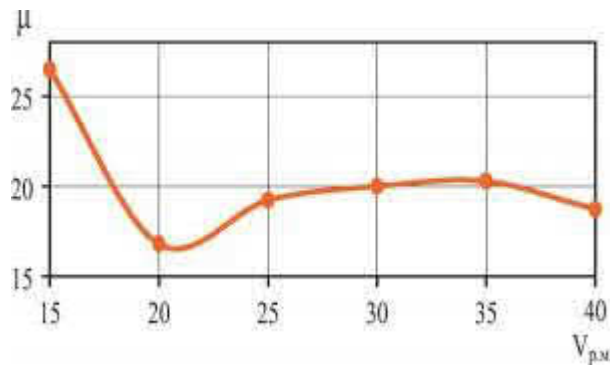
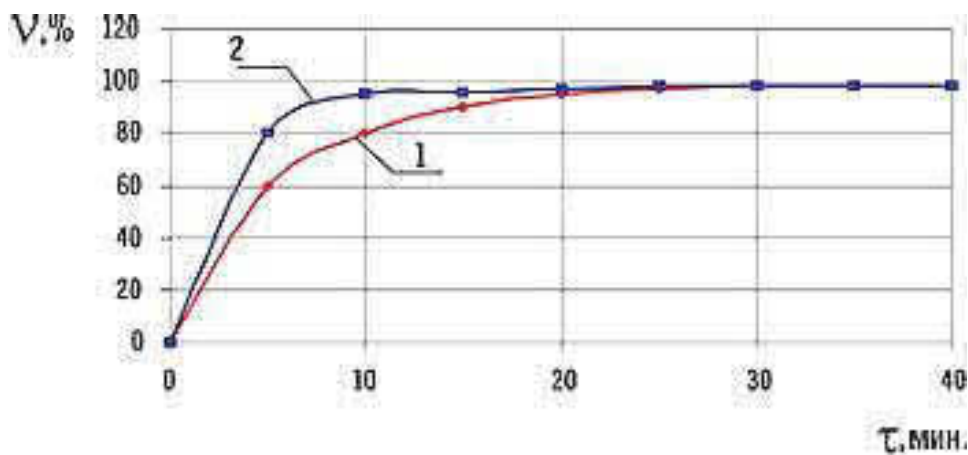


Рис. 3.13 – Залежність об'ємного вмісту гліцеринової фракції від кількості етанолу

Технологія полягає в тому, що синтез ефірів здійснюють у пристрої кавітації, а установку для одержання біопалива включено в схему стандартної технологічної лінії у такому складі: змішувач рослинної олії із спиртами й каталізатором, реактор синтезу ефірів переетерифікацією, нагрівник і розподільник продуктів етерифікації [81].

Реактор виконано у вигляді резервуара й труби, обладнаної на вході прискорювальним витком, що забезпечує вихоровий рух рідини, а на виході - звуженою ділянкою з вібраційною пластиною. Використання такого реактора спрощує технологію процесу етерифікації, інтенсифікує синтез, зменшує капітальні затрати, а також витрату енергії на нагрівання й синтез.

Нижче наведено порівняння синтезу біодизеля з використанням реактора кавітації з даними синтезу біодизеля без кавітації (рис. 3.14).

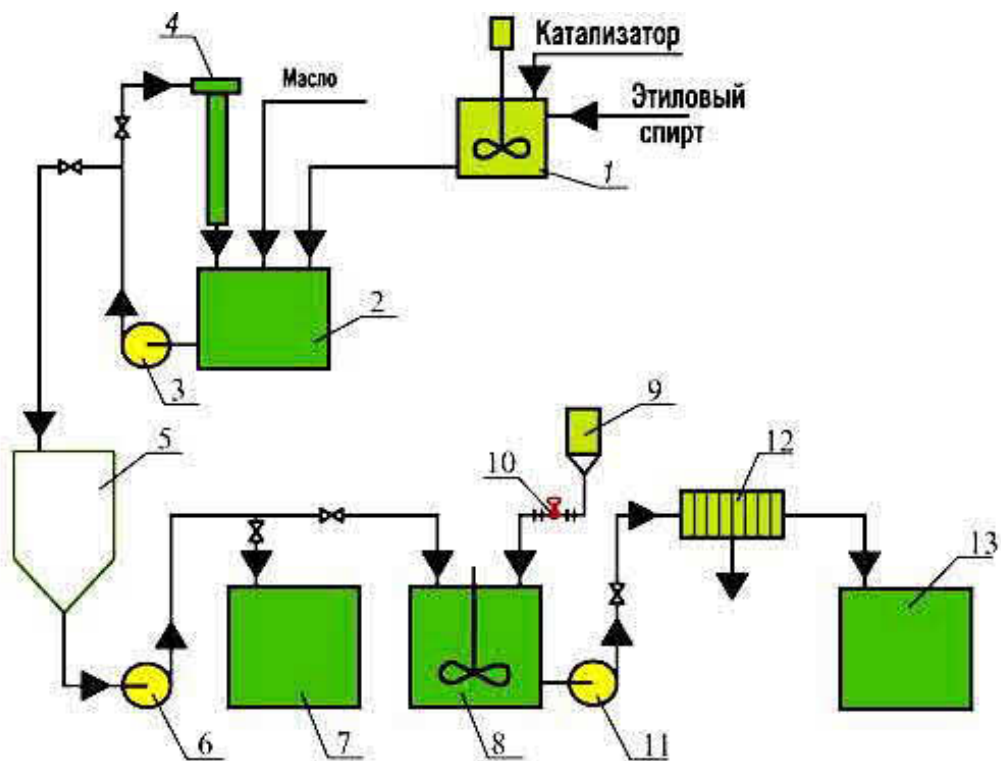


1 – без кавітації; 2 – з кавітаційним реактором

Рис. 3.14 – Залежність ступеня перетворення від тривалості реакції

Таким чином, під дією кавітації ступінь перетворення 95 % досягнуто за 5...10 хв., хоча в звичайному реакторі для цього потрібно 20...25 хв. (після досягнення робочої температури розчину в реакторі).

Пропоновану технологічну схему виробництва біодизеля й моделі гомогенізаторів наведено на рис. 3.15–3.17.



1 – реактор для одержання розчину каталізатору; 2 – реактор для синтезу біодизеля;
 3, 6, 11 – насоси; 4 – реактор кавітації; 5 – відстійник для відділення гліцеринової фракції;
 7 – збірник гліцерину; 8 – контактна ємкість для змішування адсорбенту з біодизелем;
 9 – бункер з адсорбентом; 10 – дозатор адсорбенту; 12 – фільтр;
 13 – резервуар для біодизеля

Рис. 3.15 – Схема виробництва біодизеля за новою технологією



Рис. 3.16 – Модель гомогенізатора марки TRGA



Рис. 3.17 – Модель гомогенізатора TRGA з датчиком тиску й витратоміром

3.4 Висновки

Аналіз сучасних патентно-інформаційних і літературних джерел свідчить, що сьогодні відсутнє обґрунтування вибору та комбінування найбільш ефективних методів приготування біопалива для досягнення енерго- та ресурсозбереження та збільшення виходу продукту.

Виходячи з цього, убачається перспективним застосування як гідродинамічної, так і ультразвукової кавітації, або їхнього поєднання в одному технологічному процесі приготування біопалива.

Для вирішення зазначеної проблеми ефективним буде розв'язання, зокрема, таких задач:

- дослідження ефективності комбінованих методів змішування і диспергування для підвищення ефективності і досягнення енерго- та ресурсозбереження в технологіях приготування біопалива;

- адаптація диспергувально-змішувальних комбінованих методів і обладнання (механічних змішувачів і гідромеханічних кавітаторів-диспергаторів) для приготування дво- і багатокомпонентного біопалива (на основі ріпакового, соєвого, соняшникового насіння тощо);

- експериментальне дослідження удосконаленої технології приготування дво- й багатокомпонентного біопалива на базі кавітаційних методів диспергування та змішування;

- розроблення інженерної методики розрахунку кавітаторів, призначених для використання в технології приготування дво- й багатокомпонентного біопалива;

- встановлення ефективних режимних параметрів при реалізації механічних і гідромеханічних методів приготування дво- й багатокомпонентного біопалива;

- обґрунтування принципів комбінування методів приготування дво- й багатокомпонентного біопалива, їх апаратного оформлення для підвищення ефективності процесу та досягнення енерго- та ресурсозбереження;

- обґрунтування способів та розроблення обладнання для ефективного очищення дизельного біопалива від домішок для забезпечення його відповідності EN 14214;

- розроблення практичних рекомендацій для реалізації удосконалених енерго- та ресурсозберігаючих методів приготування біопалива як у промислових масштабах, так і в умовах малих фермерських господарств.

4 ЕФЕКТИВНІ ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОЛІЇ

У цьому розділі розглянуто ефективні технічні засоби для виробництва олії, зокрема, гвинтові малотоннажні, великотоннажні та інтегровані олійні преси.

Важливим етапом виробництва олії є її очищення від фосфатидів, механічних та інших небажаних домішок. Тому також досліджено ефективні технічні засоби для реалізації цього процесу.

4.1 Олійні преси

4.1.1 Гвинтові малотоннажні олійні преси

Для пресів цього типу характерні великий вихід олії, висока якість, просте керування, неперервність процесу. Їх застосовують для різної сировини: арахісу, бобів, бавовни, рапсу, маслин, соняшнику, льону тощо.

На рис. 4.1 наведено модельний ряд гвинтових масляних малотоннажних пресів, а в табл. 4.1 – їхні технічні характеристики [82].

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики гвинтових малотоннажних олійних пресів

Модель	Продуктивність, кг/год	Потужність, кВт	Маса, кг	Розміри, мм
6YL-68	50	5,5	140	920×490×780
6YL-80	100	5,5	330	1320×540×1020
6YL-95	150...200	7,5-11,0	620	1620×630×1260
6YL-100	200	7,5	480	1640×640×1200
6YL-120	250	11	650	1820×630×1300
ZX105	200...300	11	520	1870×640×1200
ZX130	400...500	18,5	820	1930×680×1480
6YL-80D	10	5,5	450	1320×1300×1020
6YL-100D	200	7,5	610	1640×1300×1200
6YL-120D	250	11	780	1940×1300×1300
6YL-165	600	30	1100	2500×700×1700

4.1.2 Інтегровані олійні преси

В інтегрованих олійних пресах робоча температура регулюється автоматично. Швидке нагрівання до робочої температури дозволяє підвищити якість продукту.

Інтегрований олійний прес складається з вакуумного фільтра, нагрівального елемента й пульта керування.

На рис. 4.2 наведено модельний ряд інтегрованих олійних пресів, а в табл. 4.2 – їхні технічні характеристики.



Модель 6YL-68



Модель 6YL-80/100



Модель 6YL-95/120



Модель 6YL-80D/100D/120



Модель ZX105, ZX130



Модель 6YL-165

Рис. 4.1 – Модельний ряд гвинтових малотоннажних олійних пресів

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики інтегрованих олійних пресів

Модель	Продуктивність, кг/год	Потужність, кВт	Маса, кг	Розміри, мм
6YL-80A	100	5,5+0,75	520	1890×1160×1790
6YL-100A	200	7,5+1,1	780	2100×1200×1890
6YL-120A	250	11,0+1,5	950	2200×1250×1890
6YL-80H	100	5,5	380	1320×590×1020
6YL-100H	200	7,5	530	1640×690×1200
6YL-120H	250	11	700	1820×680×1300



Модель 6YL-80A/100A/120A



Модель 6YL-80H/100H/120H

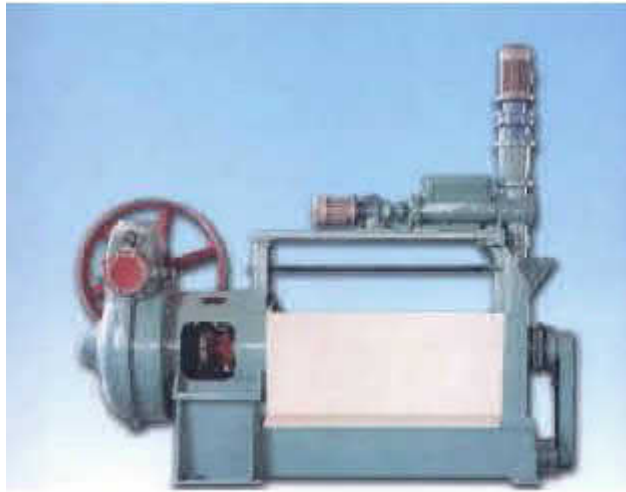
Рис. 4.2 – Модельний ряд інтегрованих олійних пресів

4.1.3 Великотоннажні олійні преси

Великотоннажні олійні преси призначено для одержання олії з насіння соняшнику, рапсу, сезаму, бавовни, а також арахісу, бобів, сої тощо. До нового покоління таких пресів належать низькотемпературні гвинтові преси LYZX18. Одержана в них олія має світліший колір, вищу якість і відповідає міжнародним стандартам. Модельний ряд цих пресів наведено на рис. 4.3, а технічні характеристики – у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики великотоннажних олійних пресів

Модель	Продуктивність, кг/год	Потужність, кВт	Маса, кг	Розміри, мм
LYZX18	6...10	27,2	3500	3176×1850×2600
200A-3	8...12	18,5	5000	2850×1850×3270
ZX24	20	36,5	8500	3200×1850×3600
ZX28	50	45	11500	3700×1920×3850
ZX32/ZY32	85...110	90/110	11000	4100×2720×3850
202-3	45...50	30	5500	2900×1850×3640



Холодний прес (температура 60...70 °С)



Модель 200А-3



Модель ZX24/ZX28



Модель 202-3

Рис. 4.3 – Модельний ряд великотоннажних олійних пресів

4.2 Ефективні технічні засоби для очищення олії від домішок

4.2.1 Технологічні засади двоступеневого очищення олії

Важливим етапом виробництва олії є її очищення від фосфатидів, механічних та інших небажаних домішок. Найефективнішим способом очищення олії від дрібнодисперсних частинок є її фільтрування. Залежно від типу фільтрувальної перегородки та умов фільтрування (тиск, температура, тривалість процесу тощо) можна досягти різного ступеня очищення.

Відома установка для очищення олії ФП2-3000 [83], в якій фільтрувальні елементи встановлено у фільтрпресі, що складається з послідовно встановлених рам і плит. Кожна плита обгортається фільтрувальною тканиною в такий спосіб, щоб дві плити й рама між ними утворювали самостійний фільтрувальний елемент.

Основними недоліками установки ФП2-3000 є великі габаритні розміри, складність конструкції, висока енергоємність, невисока надійність роботи. Тому вона не знайшла широкого використання на агровиробництві.

В Україні серійно виготовляють установки ВВП, що складається з фільтрів із напірними пластинчастими фільтрувальними елементами, а також гідростанції, технологічних резервуарів, контрольно-вимірювальної апаратури (манометр, термометр) та арматури [84]. Основні технічні характеристики установки ВВП-6: площа фільтрування 5,9 м²; габаритні розміри 650×2250 мм, маса 560 кг. Вартість установки ВВП – \$7...50 тис.

Основними недоліками таких установок є складність технічного обслуговування та невідповідність одержуваного продукту вимогам ГОСТ 1129–93 «Олія соняшникова. Технічні умови». Тому установку ВВП не можна використовувати на агровиробництві.

Для тонкого очищення олії розроблено малогабаритну установку, зображену на рис. 4.4 [85].

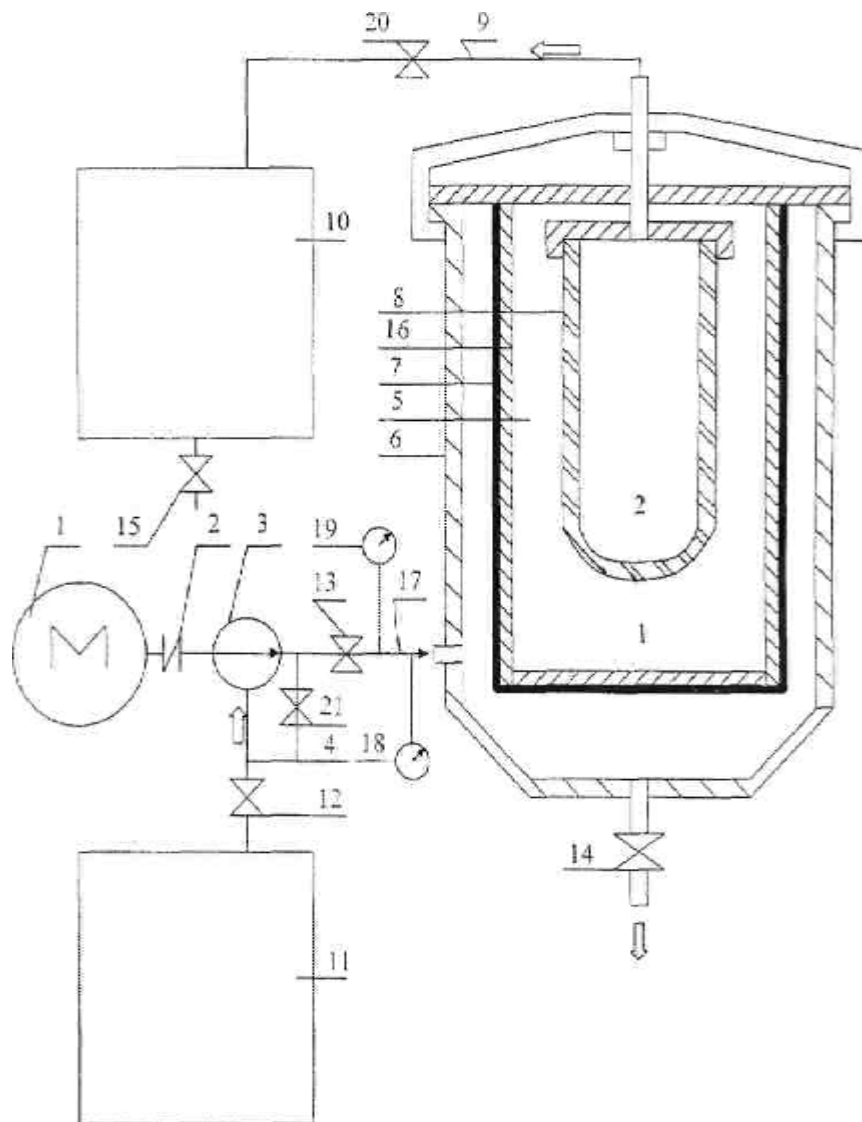


Рис. 4.4 – Установка для двоступеневого очищення олії

Установка складається з приводного електродвигуна 1, муфти 2, насоса 3, байпаса 4, з'єднувальної арматури з кранами 12-15, 20, 21, маноме-

тра 18 і термометра 19, резервуарів для неочищеної олії 11 і готового продукту 10.

Основним елементом установки є фільтр для двоступеневого очищення олії 5 із корпусом 6 циліндричної форми. У порожнині корпуса 6 встановлено каркас жорсткості 16, обгорнутий фільтрувальним елементом 7 (бельтинг-тканина, міткаль, лавсан, капрон чи дрібна сітка). Уздовж вертикальної осі корпуса вмонтовано керамічний фільтр 8 для тонкого очищення. Вхід фільтра 5 олієпроводом 17 через байпас 4 з'єднано з виходом насоса 3, а вихід фільтра приєднано до резервуара готового продукту 10.

Очищення олії від механічних домішок, фосфатидів та інших небажаних речовин здійснюють у два етапи: попереднього на бельтинг-тканині й тонкого на керамічному фільтрі.

Установка працює таким чином. Після вмикання електродвигуна 1 через муфту 2 починає працювати насос 3, який засмоктує олію з резервуара 11. При цьому крани 12 і 13 мають бути відкритими, а краном 21 регулюється початковий робочий тиск в системі, що контролюється манометром 19. Температуру олії фіксують термометром 18. При відкритому крані 13 олія прямує у фільтр 5, де попередньо очищається, проходячи крізь фільтрувальний елемент 7. Потім олію доочищають на керамічному фільтрі 8, а далі вона при відкритому крані 20 олієпроводом 9 надходить у резервуар 10. У разі засмічення фільтрувальні елементи 7 і 8 очищають стисненим повітрям, що подають у зворотному напрямку. Забруднення відводять, відкривши кран 14.

Запропоновану установку виготовлено та апробовано в умовах агро-виробництва (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Показники якості соняшникової олії після двоступеневого очищення

Показник	Значення
Сорт	вищий
Масова частка нежирних речовин, %	відсутні
Масова частка легких речовин, %	0,10
Ступінь прозорості, Фем	25
Кислотне число	0,35...0,40
Перекисне число, моль/кг	5,0...10,0
Йодне число	10

Очищена на пропонованій установці олія відповідає вимогам ГОСТ 1129-93, а сама установка забезпечує комплексне очищення олії від фосфатидів, механічних та інших домішок, є простою в обслуговуванні та надійною в експлуатації, у ній відсутні втрати олії, витрати електроенергії є меншими, аніж у звичайних фільтрів, на 20...30 % у порівнянні з існуючими фільтрами. Таким чином, її можна успішно використовувати в агро-виробництві.

4.2.2 Установа для комплексного очищення олії

Дотепер в агровиробництві та фермерських господарствах широко розповсюджена спрощена технологія одержання олії, яка не відповідає вимогам ГОСТ 1129-93 за вмістом механічних домішок, вологи й канцерогенних речовин.

Комплексне очищення олії з одночасним її освітленням можна реалізувати за допомогою фільтрів і відцентрових апаратів, не застосовуючи адсорбентів та інших реагентів, небезпечних для споживача.

Відомі фільтр-преси з вертикальним розташуванням перегородок [86], які складаються з вертикальних рифлених плит і пустотілих рам, обгорнутих фільтрувальною тканиною чи металевією сіткою. Кожна пара суміжних плит і рама утворюють самостійний фільтрувальний елемент.

Ці фільтри мають невисоку продуктивність і надійність, займають велику площу, енергоємні, вимагають ручного очищення. Окрім того, перші порції очищеної на них олії є мутними й потребують повторного фільтрування. Через це фільтр-преси не набули широкого використання в агровиробництві й фермерських господарствах.

В апараті, описаному в патенті [87], олію оброблюють дрібнодисперсним адсорбентом у кількості 0,5...4,0 % від маси очищеної олії, а потім фільтрують. Як адсорбент використовують порошок із природних опок і трепелів, які попередньо активують, витримуючи за температури 250...350 °С протягом 0,5...1,0 год.

Проте використовуваний адсорбент час від часу потребує регенерації (відновлення первинних властивостей), а потім – утилізації. До того ж якість одержуваного в такий спосіб продукту не завжди відповідає вимогам ГОСТ 1129-93.

Для комплексного очищення олії розроблено блочно-модульну установку (рис. 4.5), що складається з насосної станції 1, колектора 2, електронагрівника 3, центрифуги 4, технологічного бака 5 і резервуара 21, дегазатора 7, блоку фільтрів 9, вакуумметра 6, гідродинамічного випромінювача 8, кранів 10-15, 17-19, 22 і датчика температури 16.

Гідродинамічний випромінювач (рис. 4.6), що генерує збурення в олії, які полягають у періодичному перериванні струменя, працює за малих тисків (0,15...0,20 МПа) у режимі коагуляції фосфатидів і механічних домішок і складається з гідродинамічної труби з соплами 1, 2 і секціями 3, між якими встановлено стійкі до олії ущільнювальні кільця 6. На виході випромінювача встановлено кран 7 для регулювання тиску. Випромінювач встановлюють вертикально, виходом догори, причому діаметр виходу D_2 є більшим, аніж діаметр входу D_1 .

Установка працює таким чином. Олія з резервуара 21 усмоктується насосом 1 у колектор 2, а потім крізь кран 10 надходить до випромінювача 8, дегазується та очищується на фільтрах 9 і центрифугі 4. Злив олії здійснюють у бак 5, з'єднаний із насосною станцією 1 краном 16 та обладнаний вакуумною станцією 6 і запірним вакуумним краном 17. Тиск у системі

контролюють манометрами 18, 19 і вакуумметром 20, температуру олії вимірюють датчиком температури 16.

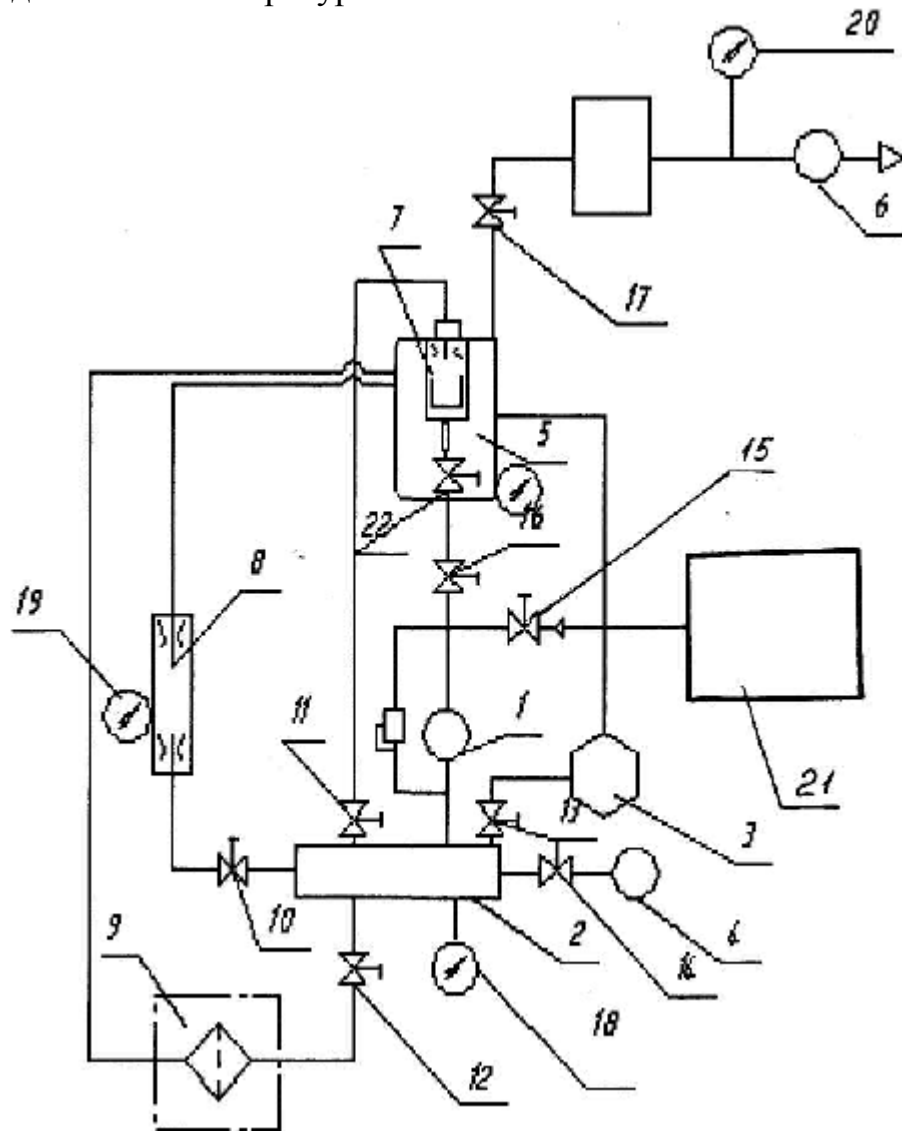


Рис. 4.5 – Гідралічна схема установки

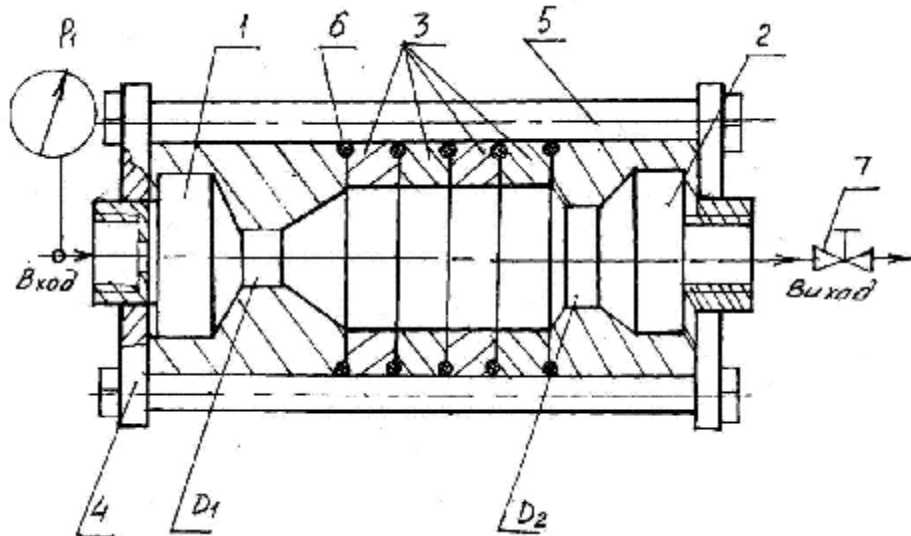


Рис. 4.6 – Схема гідродинамічного випромінювача

Установка може працювати в декількох режимах. Зокрема, видалення води й легких фракцій з олії здійснюють, відкриваючи крани 15 і 13; інші крани перекривають; умикають насосну станцію 1, подаючи олію в бак 5, після заповнення якого крани 13 та 15 перекривають, а кран 16 відкривають. Потім олію нагрівають до температури плавлення восків у нагрівнику 3, контролюючи температуру датчиком 15. Далі відкривають кран 11 для надходження олії в дегазатор 7, при цьому поступово відкривають кран 13, щоб досягти тиску 1,6 МПа, який контролюють манометром 18. Після виходу установки на усталений режим умикають вакуумну станцію й відкривають кран 17; рівень вакууму в баку 5 контролюють вакуумметром 20. Тиск у колекторі регулюють краном 13, кран 22 рівнеміра під вакуумом перекривають.

Вилучення механічних домішок здійснюють на фільтрах 9 чи центрифугі 4. Для цього повністю відкривають кран 13, закривають кран 11, відкривають кран 10, умикають випромінювач 8; регулюючи відкриття крана 13, встановлюють тиск 0,8 МПа на манометрі 19.

Після оброблення у випромінювачі 8 здійснюють очищення олії на фільтрах 9 у такий спосіб: повністю відкривають кран 13; перекривають крани 10 і 11; відкривають кран 12, поступово перекривають кран 13 і встановлюють у колекторі 2 за манометром 18 тиск 0,2...0,3 МПа. При цьому установка працює в циклічному режимі. Потім, за потреби, здійснюють доочищення олії в центрифугі 4.

Коагуляцію восків і механічних домішок здійснюють без нагрівання олії за температури нижче точки плавлення восків; тиск олії у випромінювачі 0,15...0,20 МПа, бажане співвідношення $P_1/P_2 = 3...4$. Положення випромінювача – вертикальне; тривалість оброблення в режимі коагуляції 30 хв.; тиск олії в колекторі 0,6...0,8 МПа.

Тонке очищення та освітлення олії здійснюють шляхом підключення фільтрів 9 фільтрації за температури до 60 °С і тиску не більше 0,5 МПа (бажаний – 0,20...0,25 МПа); перепад тиску олії до та після фільтрів – не більше 0,15 МПа.

Дослідний зразок розробленої установки апробовано на виробництві. Одержано такі результати: продуктивність 150...450 л/год.; споживана потужність 9,5 кВт; очищена олія відповідає вимогам ГОСТ 1129-93, належить до вищого сорту та є екологічно чистою завдяки застосуванню лише фізико-механічних процесів без хімічного оброблення.

4.3 Висновки

Для одержання олії з різних культур в Україні розроблено ряд ефективних технічних засобів, зокрема, гвинтових малотоннажних, великотоннажних та інтегрованих олійних пресів. Для них характерними є великий вихід олії, висока якість, просте керування, неперервність роботи.

Важливим етапом виробництва олії є її очищення від фосфатидів, механічних та інших небажаних домішок.

Комплексне очищення олії з її одночасним освітленням можна реалізувати за допомогою фільтрів і відцентрових апаратів, не застосовуючи адсорбентів та інших реагентів, небезпечних для споживача.

В Україні існують компактні й легкі в керуванні установки блочно-модульного типу, що забезпечують ефективне комплексне очищення олійної сировини з одержанням екологічно чистих продуктів в умовах міні-цехів і фермерських господарств.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ КАВІТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

У цьому розділі наведено опис експериментального гідродинамічного стенду для досліджень гідродинамічних характеристик кавітаторів в обмежених потоках на режимах штучної кавітації, результати експериментальних досліджень кавітаторів у вигляді дисків і конусів із різним діаметром основи й кутом розкриття при його вершині, проаналізовано динаміку виносу газу з вентиляльованих каверн, а також описано особливості ежекції на режимах штучної кавітації й кавітаційного опору на режимах розвиненої кавітації.

5.1 Стенд для дослідження гідродинамічних характеристик кавітаторів в обмежених потоках на режимах штучної кавітації

Експериментальний гідродинамічний стенд (рис. 5.1 і 5.2) складається з контактної камери 4, де встановлюють кавітаційні елементи 5 і виконують візуальні спостереження, фотографування, кінозйомку; циркуляційної системи з відцентрового насоса 15 і повітропроводу 8, завдяки якій створюється високошвидкісний потік у камері 4; абсорбційної системи з абсорбера 1 і дегазатора 9; системи вентилявання кавітаційної каверни газовим носієм, що утворюється в контактній камері 4 за кавітатором 5, у складі порожнистої гондоли 2, повітропроводу 8, вентилятора 14 і редукційного вентиля 10; систем вимірювання й змінення тиску, швидкості, температури, витрат рідкої й газової фаз.

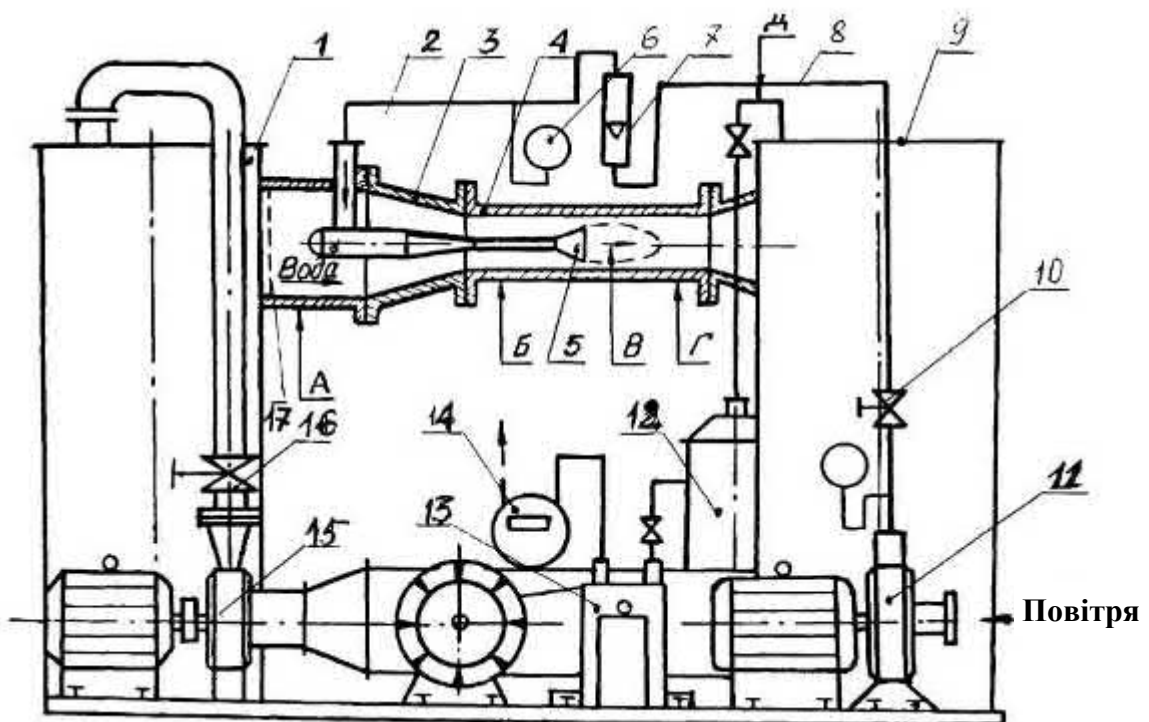


Рис. 5.1 – Схема експериментального гідродинамічного стенда

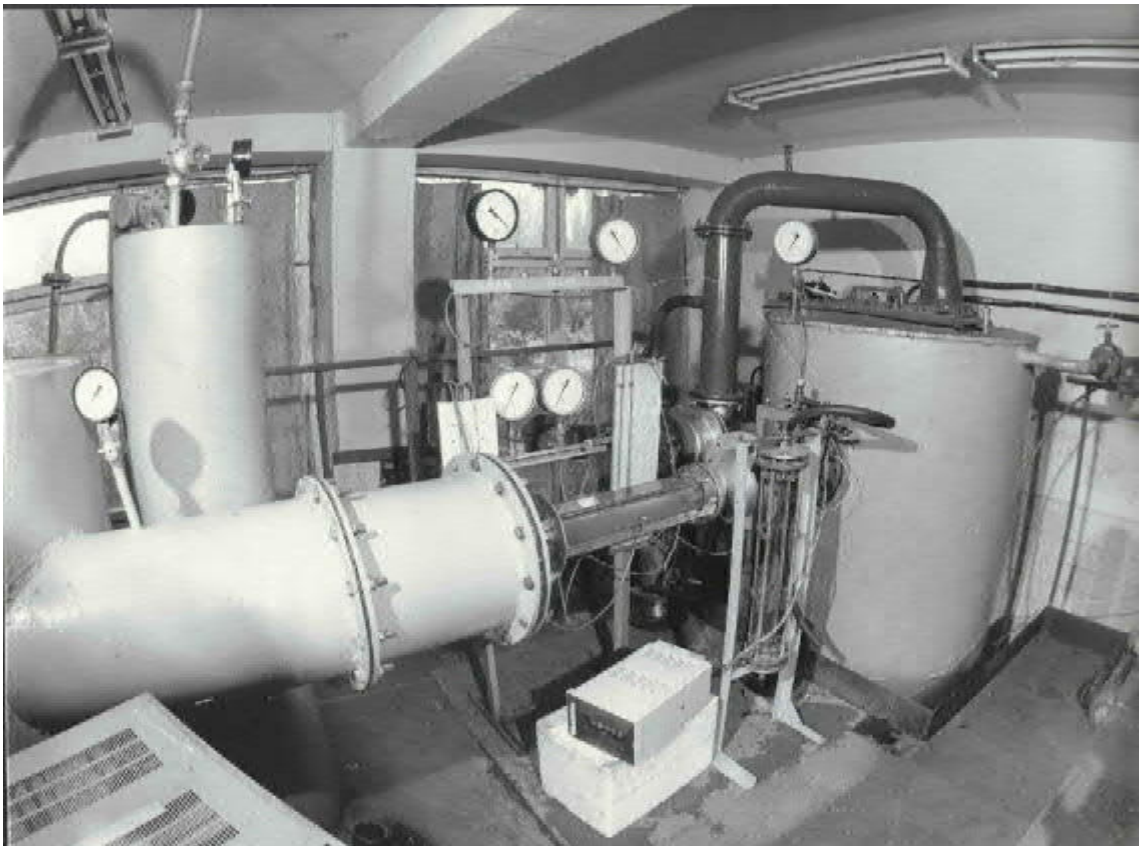


Рис.5.2 – Експериментальний гідродинамічний стенд

Робочу частину стенда розташовано між абсорбером 1 і дегазатором 10. Вона складається з квадратної контактної камери 4, виконаної з кварцового скла, із діаметром робочого отвору 0,070 чи 0,115 м і довжиною 0,41 м, а також конфузора 3, що створює необхідну швидкість і падіння гідростатичного тиску на вході в камеру 4. Кавітатор 5 (у вигляді конуса, диска, кавітаційного сопла) розташовано в центрі камери 4. Кавітаційна каверна, що утворюється за кавітатором 5, вентильовується газовим носієм за допомогою порожнистої гондоли 2, сконструйованої спеціально для цих досліджень (рис. 5.3–5.5).

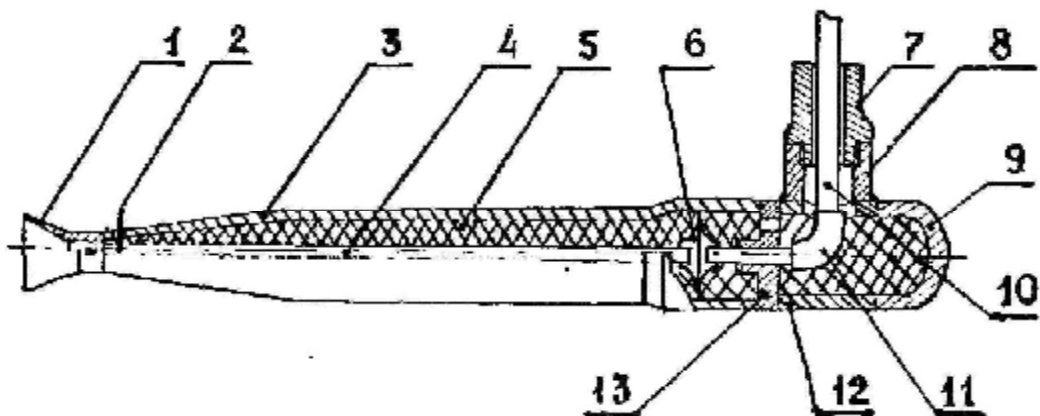


Рис. 5.3 – Схема порожнистої гондоли



Рис. 5.4 – Порожниста гондола в зборі

Гондола (див. рис. 5.3) складається з циліндричного корпусу 3, в якого коаксіально вмонтовано трубку повітропроводу 4 із термокомпенсуючою мембраною 6. На одному кінці трубки закріплено кавітатор 1, інший за допомогою колінця 11 і повітропроводу сполучено з вентилятором чи атмосферою. Завдяки цьому газовий носій має можливість надходити безпосередньо в порожнину кавітаційної каверни. Герметичність забезпечено кріпленням в стакані 7. Хромель-копелеву термопару для вимірювання температури газового носія встановлено в центрі трубки 4, а її КТС-кабель ізольовано скловатою 5 і з'єднано з температурним вимірювачем крізь отвір у заглушці 13. Обтічник 9 забезпечує мінімальний гідродинамічний опір гондоли і майже не змінює гідродинаміку потоку, що набігає на кавітаційний елемент.

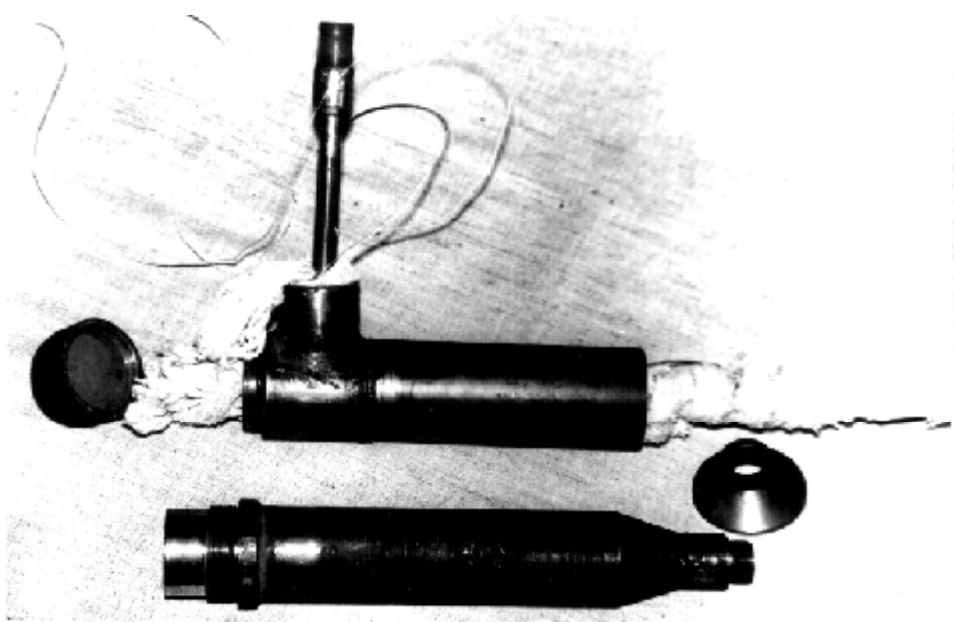


Рис. 5.5 – Порожниста гондола в розібраному стані

Відцентровий насос 15 (4К-6ПМ) потужністю 55 кВт нагнітає рідку фазу в циркуляційний контур і забезпечує її циркуляцію крізь контактну камеру 4 (рис. 5.6) зі швидкістю 10...15 м/с. У камері 4 встановлюють кавітатори з різним діаметром основи, щоб забезпечити різний ступінь стиску потоку. Залежно від режиму кавітації газова фаза або самозасмоктується в каверну, або нагнітається вентилятором.

Газорідинну суміш із контактної камери вільним струменем спрямовували в дегазатор 9, принцип дії якого описано в праці [6].

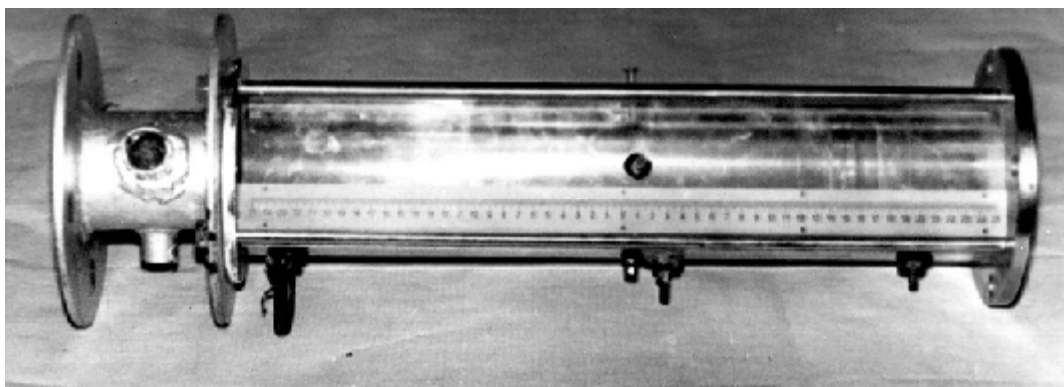


Рис. 5.6 – Контактна камера

Температуру газової фази вимірювали хромель-копелевою термопарою, встановленою в гондолі 2, і реєстрували 12-ти канальним цифровим потенціометром А-565. Тиск у каверні вимірювали зразковим манометром 6 за допомогою тонкої металевої трубки діаметром 0,004 м, вільний кінець якої було розташовано в кавітаційній каверні. Витрату газової фази Q_0 змінювали від 0,63 до 40 м³/год, вимірювали за допомогою ротаметрів РС-5 і нормували за формулою [120]:

$$Q = 283,73 Q_0 P / (kT), \quad (5.1)$$

де Q_0 – витрата газової фази за температури 20 °С; P – тиск у повітропроводі до ротаметра, Па; T – температура газоносія в каверні, К; k – коефіцієнт стисливості газу.

Відсмоктування газу, що виділяється в дегазаторі, здійснювали вакуум-насосом 13 крізь ресивер 12, а витрату вимірювали газовим лічильником 14 типу РГ-40, встановленим на вихідному патрубку вакуум-насоса 13. Оскільки деяку кількість газових бульбашок виносить із потоком, було встановлено абсорбер 1, що вирівнював уміст розчиненого в рідині газу.

Для стабілізації гідродинамічних коливань під верхньою кришкою абсорбера 1 було встановлено пневматичні (із пружних камер, заповнених повітрям), а на вході в конфузур – сітчастий (із дроту діаметром 2 мм і чарунками 5×5 мм) гасильники коливань.

Тиск і швидкість рідини в контактній камері регулювали засувкою 16. Контроль тиску й швидкості здійснювали за допомогою системи вакуумних кранів і зразкових манометрів.

Як модельні носії використовували воду й повітря.

5.2 Дослідження гідродинаміки кавітаційного потоку

Досліджено кавітатори у вигляді дисків і конусів різного діаметра основи із кутом розкриття $(45 \pm 0,5)^\circ$ (табл. 5.1 і рис. 5.7). Це забезпечило різний ступінь стиску потоку рідини, що подавали в контактну камеру.

Таблиця 5.1 – Параметри досліджених кавітаторів і режимів

Діаметр основи кавітатора, м	0,035	0,04	0,049	0,056	0,063	0,0665
Діаметр контактної камери, м	0,07	0,055	0,07	0,07	0,07	0,07
Ступінь стиску потоку	0,5	0,73	0,7	0,8	0,9	0,92
Кут розкриття конуса, °	45	45	45	45	45	45
Діапазон зміни чисел Фруда	7,5...10	7...14	6,4...17	7...12	6,0...8,3	6,0...6,4

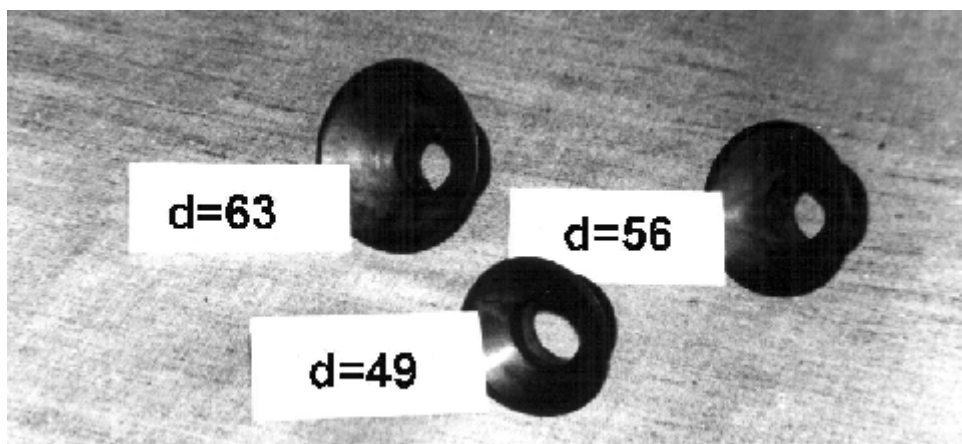
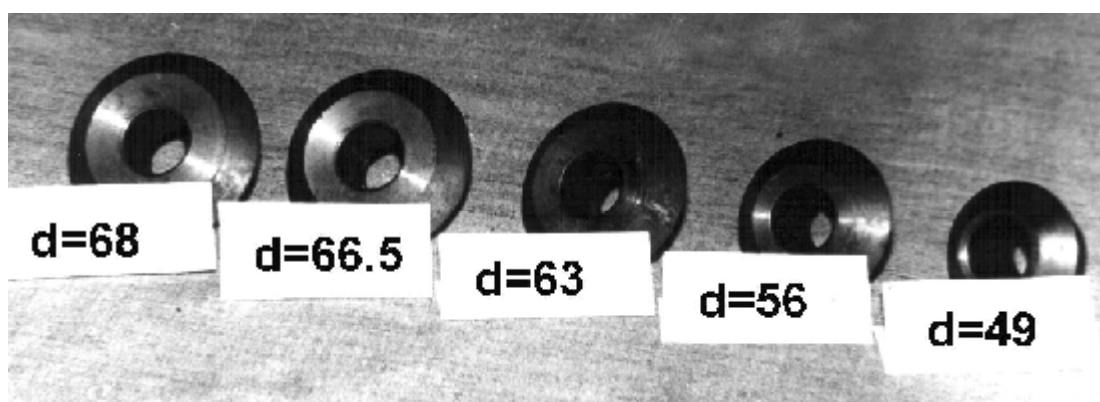
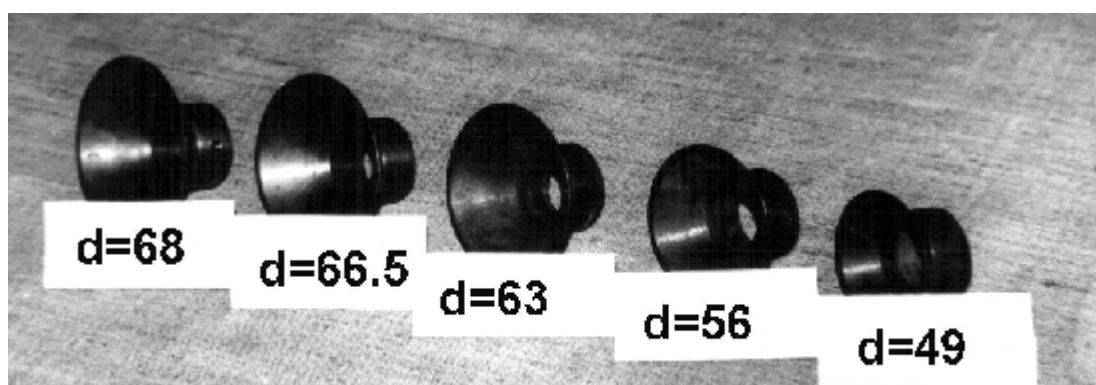


Рис. 5.7 – Досліджені кавітатори

5.2.1 Параметри моделювання кавітаційних процесів

Виходячи з аналізу умов омивання кавітаторів, режимних параметрів, фізико-хімічних властивостей модельних рідин і газів, встановлено такі модельні параметри, що характеризують кавітаційні процеси на режимах штучної кавітації.

Число кавітації [7]:

$$\chi = 2(P_0 - P_k)/(\rho V_0^2), \quad (5.2)$$

де P_0 – тиск рідини на вході в контактну камеру, Па; P_k – тиск газової фази в порожнині кавітаційної каверни, Па; ρ – густина рідини, кг/м³; V_0 – швидкість рідкої фази на вході контактну камеру, м/с.

Число Фруда [7]:

$$Fr = V/\sqrt{gd}, \quad (5.3)$$

де d – діаметр основи кавітатора, м.

Число Рейнольдса [7]:

$$Re = Vd\sqrt{1+\chi}/\nu, \quad (5.4)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, м²/с.

Ступінь стиску потоку:

$$\delta = d/D, \quad (5.5)$$

де D – діаметр контактної камери в місці розташування кавітатора, м.

Відносна довжина кавітаційної каверни:

$$\lambda = L/d, \quad (5.6)$$

де L – довжина кавітаційної каверни, м.

Кавітаційний опір [7]:

$$C_x = 2\Delta P/(\rho V_0^2) \quad (5.7)$$

де ΔP – падіння тиску в контактній камері, Па.

Коефіцієнт ежекції:

$$u = Q/U, \quad (5.8)$$

де Q , U – витрата газової й рідкої фази, відповідно.

Відносні витрати газової фази:

$$q = Q/(V_0 d^2). \quad (5.9)$$

5.2.2 Розміри кавітаційної каверни

Більшу частину досліджень кавітаційної каверни присвячено режимам штучної кавітації для безмежних рідин [7] та обмеженим рідинам – в основному за ступеня стиску 0,01...0,1 [121, 122]. Зокрема, у праці [123] автор дослідив зміни параметрів кавітаційної каверни на режимах природ-

ної кавітації за ступенів стиску потоку 0,3...0,7, у праці [122] – на режимах штучної кавітації за 0,1...0,3.

Дослідження, проведені авторами для ступенів стиску 0,73...0,93, підтвердили висновки авторів [7, 122, 123] стосовно впливу основних модельних параметрів на геометричні розміри каверни.

У праці [123] запропоновано такі емпіричні рівняння для розрахунку довжини каверни на режимах природної кавітації:

$$\text{для } d/D_0 = 0,025...0,500; Fr = 7,0...25,1; Re = (4,5...7,3) \cdot 10^5; T_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L_1 = 0,1\chi^{-2}(d/D_0)^{1,25}Fr^{0,5}Re^{0,25}; \quad (5.10)$$

$$\text{для } d/D_0 = 0,024...0,360; Fr = 9,5...15; Re = (1,2...1,6) \cdot 10^6; T_0 = 110...120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L_2 = 0,06\chi^{-2}(d/D_0)^{1,25}Fr^{0,5}Re^{0,25}(\Delta T/T_0)^{-0,25}. \quad (5.11)$$

Порівняння з результатами експериментів Епштейна [7, 124] і Лапіна [122] свідчить, що в діапазонах $0 < \delta < 0,1$ і $0,1 < \delta < 0,5$ зміни відносної довжини каверни λ від основних модельних параметрів є ідентичними.

Наші дослідження свідчать, що подальше збільшення ступеня стиску на режимах штучної кавітації суттєво змінює ширину й довжину каверни, а також характер виносу газової фази.

У праці [123] одержано такі емпіричні залежності відносної довжини каверни від модельних параметрів на режимах штучної кавітації:

$$\text{для } \delta = 0,7...0,8; \chi = 1,2...3,0; q = 0,02...1,20; Fr = 10...17$$

$$\lambda = 15 \cdot 10^{-8} e^{24\delta} \chi^{-2,5} Fr^{0,81}; \quad (5.12)$$

$$\text{для } \delta = 0,8...0,9; \chi = 1,2...5,0; Fr = 10...17.$$

$$\lambda = 6,8 \cdot 10^{-8} e^{24\delta} \chi^{-2,5} Fr^{0,81}. \quad (5.13)$$

Відхилення експериментальних даних від розрахованих за рівняннями (5.12) і (5.13) не перевищує 10 %. Порівняння цих рівнянь із наведеними в працях [7, 122, 123] свідчить, що показники степеня в них є приблизно рівними, а значення коефіцієнта суттєво різняться. Так, наприклад, у [122] він дорівнює 0,05, у [123] – 0,1.

На рис. 5.8 наведено залежності $\lambda = f(\chi, Fr)$ для ступенів стиску потоку 0,7...0,9 на режимі штучної кавітації, одержані одним з авторів. Порівняння цих даних із розрахунками за (5.12) і (5.13) свідчать, що відхилення не перевищує 14 %.

Установлено, що зростання ступеня стиску потоку зміщує область робочих режимів у зону вищих чисел кавітації. Режим штучної кавітації в обмеженому потоці дозволяє здійснювати дослідження за ступенів стиску понад 0,73, тоді як за природних умов, коли $0,7 < \delta < 0,73$, спостерігається кавітація на стінках контактної камери й здійснювати дослідження є неможливим.

Візуальні спостереження свідчать, що на режимах штучної кавітації за витрати газової фази $q \geq 0,1$ майже зникають пульсації хвостової частини каверни. При цьому довжина каверни, що вентилюється, суттєво збіль-

шується порівняно з довжиною каверни за цих же умов у разі відсутності вентиляції. Водночас рівень кавітаційного шуму зменшується. Тобто кавітація з вентиляванням повітрям стає «м'якою».

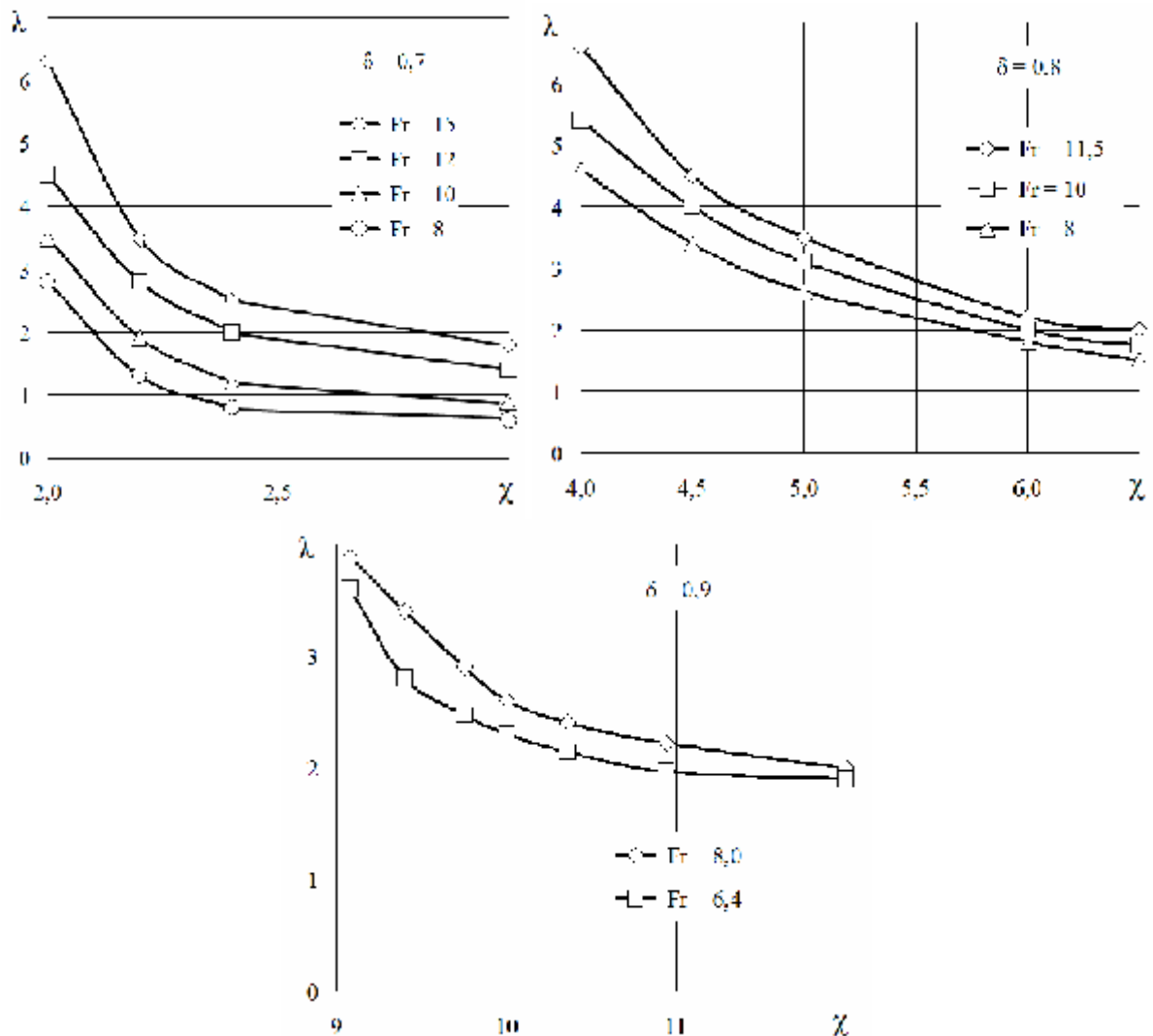


Рис. 5.8 – Залежності відносної довжини каверни від числа кавітації для різних ступенів стиску потоку і чисел Фруда

У разі штучної кавітації контактну камеру заповнено щільніше, верхня кавітаційної каверни є стабільнішою й більшою, тобто є більшою площею поверхні масообміну між фазами.

Мідель каверни за ступенів стиску 0,7...0,9 майже не змінюється за довжиною. Кавітаційна каверна займає весь переріз контактної камери, і її мідель дорівнює діаметру основи кавітатора незалежно від його форми. У розрахунках його можна взяти рівним діаметру основи кавітатора.

За ступеня стиску понад 0,7 каверна є циліндром із прозорою чи емульсійною поверхнею, повітря з якої евакуується безперервними шнурами чи пульсаційно з її хвостової частини.

Для необмежених рідин за ступеня стиску менше 0,7 каверна вентилюється примусово від вентилятора, а для $\delta > 0,7$ спостерігається самозасмоктування повітря, тобто вентилювання здійснюється ежектуванням.

Таким чином, встановлено, що:

- більшим значенням чисел Фруда за однакових чисел кавітації відповідає більша відносна довжина кавітаційної каверни;
- збільшення ступеня стиску потоку зміщує гідродинамічні характеристики в зону більших чисел кавітації;
- мідель каверни, що вентилюється, майже за всією довжиною дорівнює діаметру основи кавітатора незалежно від його форми;
- за ступенів стиску понад 0,7 на режимах штучної кавітації спостерігаються ефекти ежекції повітря й кавітації одночасно.

5.3 Динаміка виносу газу з вентилюваних каверн

Практичний інтерес має встановлення залежностей відносно витрати газової фази, що вентилює каверну, від чисел кавітації, Рейнольдса, Фруда й ступеня стиску потоку рідини, а також відносно довжини кавітаційної каверни від відносно витрати газової фази. Деякі з цих залежностей наведено на рис. 5.9.

Тиск P_k у каверні, що вентилюється газовою фазою, був завжди вищим, аніж тиск насиченої пари рідини, і змінювався від 13 до 50 кПа залежно від витрати газу, що засмоктувався в каверну. Відносні витрати газової фази визначали за формулою (5.9) за діапазону витрати 0,1...12 м³/год. При цьому швидкість на вході в контактну камеру змінювалась від 2,2 до 15 м/с.

Малі значення відносно витрати ($q = 0,05...0,08$) характеризувалися пульсаційним виносом газової фази з хвостової частини кавітаційної каверни. Збільшення витрати до 0,1 сприяє плавному переходу від пульсацій до безперервного виносу вихоровими шнурками.

На відміну від відповідних залежностей для необмеженої рідини [7], для обмеженого потоку L-подібна крива із зростанням ступеня стиску зміщується в бік вищих чисел кавітації за однакової витрати повітря, що вентилює каверну. Окрім того, підвищується чутливість системи контактна камера–кавітатор–каверна до зміни витрати газової фази. Це відображається в зміні відносно довжини каверни, оскільки її ширина в міделі залишається рівною діаметру основи кавітатора.

Найбільші значення відносно довжини одержано за ступеня стиску 0,9 ($q = \text{idem}$). Шляхом узагальнення експериментальних даних одержано емпіричне рівняння

$$q = 0,75\lambda^2\delta^{-3,8}\text{Re}^{-0,44}\text{Fr}^{0,1}, \quad (5.13)$$

справедливе для $q = 0,01...0,12$; $\lambda = 1,2...5,0$; $\delta = 0,7...0,9$; $\text{Re} = (2,5...4,9) \cdot 10^5$; $\text{Fr} = 8...17$.

Розбіжність між експериментальними даними й результатами розрахунку за формулою (5.13) не перевищує 1 %.

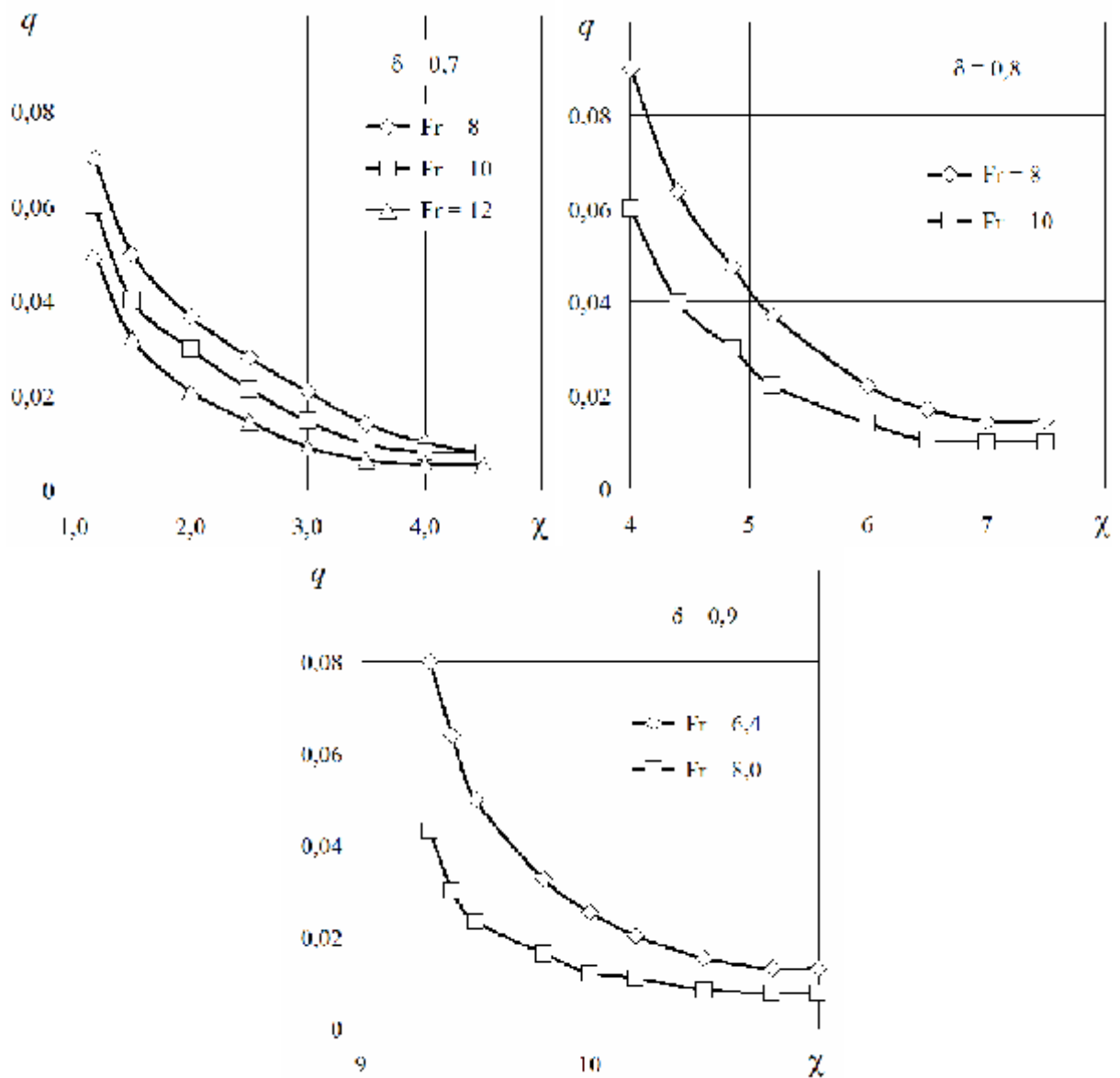


Рис. 5.9 – Залежності відносної витрати газової фази від числа кавітації для різних ступенів стиску потоку

Залежності відносної довжини каверни від відносної витрати газової фази, що вентилює каверну, одержані на основі розрахунку за формулою (5.13), наведено на рис. 5.10.

Фотографування каверн в потоці (рис. 5.11) дозволило спостерігати динаміку виносу газової фази з каверни зі зміною витрати газової фази, що засмоктувалася, і швидкості рідкої фази в контактній камері.

Установлено, що штучна кавітація має таку динаміку. Початкова кавітація ($0,01 < q < 0,04$) характеризується появою за кавітатором окремих кавітаційних бульбашок та їх невеликих скупчень, які зносить потік рідини. Зростання відносної витрати газової фази до 0,05 веде до утворення за кавітатором емульсійної каверни з поверхнею, що має вигляд рідини, що інтенсивно кипить. Винос здійснюється ланцюгами повітряних і кавітаційних бульбашок.

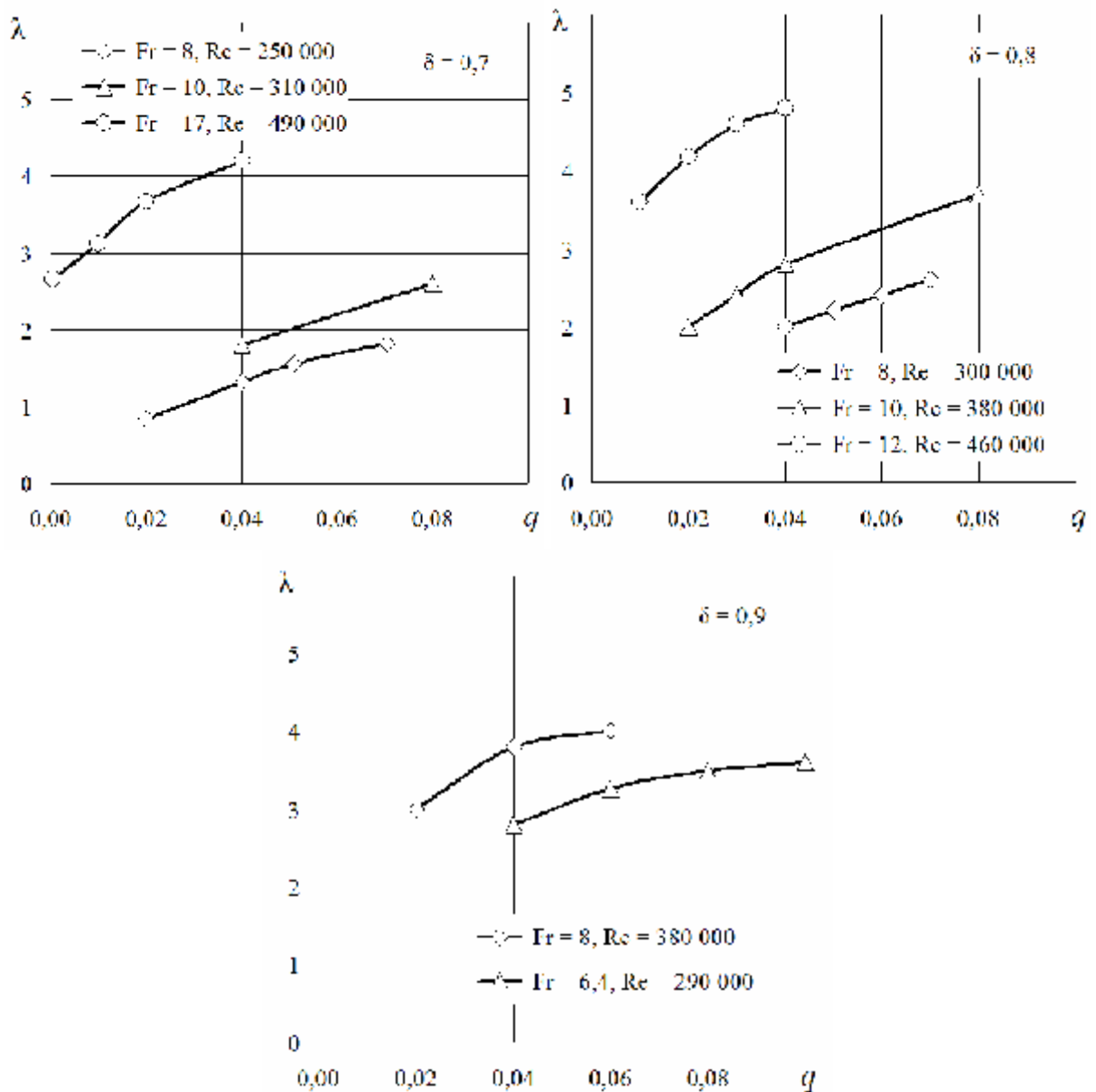
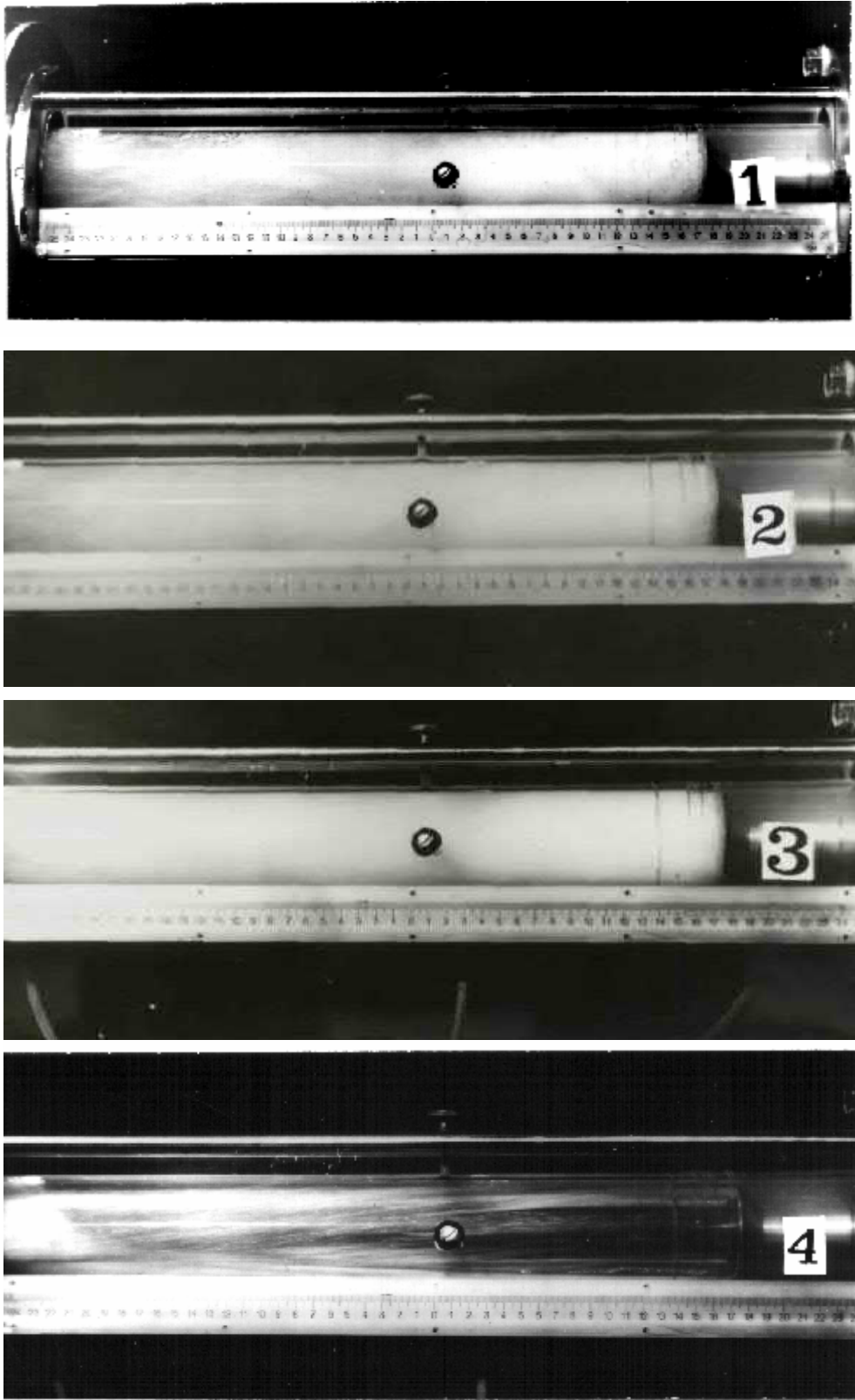


Рис.5.10 – Залежності відносної довжини каверни від відносної витрати газової фази, що вентилює каверну, за різного ступеня стиску

Подальше зростання витрати газу ($0,05 < q < 0,08$) сприяє утворенню пульсаційного режиму, оскільки винос повітря з каверни дифузією чи невеликим скупченнями бульбашок стає недостатнім. Хвостова частина каверни прагне утворити стаціонарний зворотний струмінь, що протидіє зростанню тиску в каверні і сприяє накопиченню повітря в каверні до певного значення. Після його досягнення відбувається інтенсивна зміна довжини каверни й пульсаційний викид певної порції повітряних і кавітаційних бульбашок із хвостової частини каверни нестационарними вихорами. Частота пульсаційних викидів змінюється залежно від швидкості рідкої фази й витрати газової фази [125].



$1 - \delta = 0,7$; $2 - \delta = 0,8$; $3 - \delta = 0,9$;
 $4 - \delta = 0,8$ із розвиненою кавітацією і циркуляцією на поверхні каверни

Рис. 5.11 – Кавітаційні каверни за різних ступенів стиску

Режим безперервного виносу вихоровими шнурами спостерігається, коли $q > 0,08$. Поверхня каверни прозора, а хвостова частина заповнена пі-

ною, краплями рідини й кавітаційними бульбашками. Поверхня контакту фаз є максимальною. Винос газу здійснюється безперервно вихоровими шнурами з циркуляцією. На поверхні каверни спостерігаються «хвилі», вона ніби «омивається» рідиною за гвинтовою лінією. На відміну від течії в необмеженій рідині перехід від пульсацій до безперервного виносу відбувається плавно, без стрибків [7].

За значення ступеня стиску потоку 0,93, коли швидкість рідкої фази становить 7 м/с, можна спостерігати режим «замикання» труби.

Таким чином, найбільш прийнятними для конструювання кавітаційних аераторів є конструкції, в яких ступінь стиску потоку становить 0,7...0,9, за таких режимних параметрів: $q = 0,01...0,12$; $\lambda = 1,2...5,0$; $Re = (2,5...4,9) \cdot 10^5$; $Fr = 8...17$.

5.4 Ежекція на режимах штучної кавітації

Враховуючи важливість досліджених явищ із технологічної точки зору, було визначено максимально можливі об'єми повітря, що інжектуються в кавітаційну каверну.

Експерименти виконували з кавітаторами за ступеня стиску потоку 0,7...0,9. Особливістю цих досліджень була необхідність підтримання сталого тиску в дегазаторі (тиск протидії), оскільки самозасмоктувалися значні обсяги повітря. Тому вакуум-насос працював безперервно.

Одержано характеристики режимів кавітації у разі ежекції повітря $u = f(\delta, Fr)$ і $u = f(P, \delta)$, де $P = (P_3 + P_k)/(P_0 + P_k)$. Найбільші $u = 1,0...1,2$ одержано, коли $\delta = 0,9$ і $Fr = 10,4$.

Маса розчиненого газу в рідині за тиску P_a за законом Генрі [126]:

$$M = kP_aV_p, \quad (5.14)$$

де k – константа розчинності; V_p – об'єм рідини.

Коли $V_p = 1 \text{ м}^3$, $M = kP_a$.

За нормальних умов розчинність повітря в воді становить декілька відсотків, тому для насичення води газом коефіцієнт ежекції становитиме не більше 0,1...0,2. Таких значень u для кавітаційного режиму з ежекцією повітря цілком можливо досягти.

5.5 Кавітаційний опір на режимах природної й штучної кавітації

Важливим питанням розрахунку кавітаційних апаратів є визначення опору контактної камери, в якій розташовують кавітаційні елементи. Для оцінки цього опору за різних гідродинамічних режимів визначали різницю статичних тисків у контактній камері до й після кавітатора.

Визначати опір власне кавітаційного елемента є недоцільним, оскільки в ньому не враховано взаємоіндукцію труби контактної камери і встановленого в ній кавітатора. Тому вимірювали лише загальний опір ко-

тактної камери з кавітаційним елементом. Однак, щоб порівняти експериментальні дані з даними інших авторів, опір власне кавітатора все ж визначали, як різницю між опором $P_{\text{кк}}$ контактної камери разом з кавітатором й розрахованим теоретично гідравлічним опором труби контактної камери $P_{\text{тр}}$, еквівалентним опору контактної камери без кавітатора [127]:

$$C_x = P_{\text{кк}} - P_{\text{тр}} \quad (5.15)$$

Результати досліджень на режимах природної кавітації (рис. 5.12) свідчать, що за ступеня стиску потоку 0,7 зростання числа Fr в діапазоні 8,0...15,5 збільшує кавітаційний опір. Реалізація режимів природної кавітації для $\delta > 0,7$ є неможливою, оскільки спостерігається кавітація на стінках контактної камери.

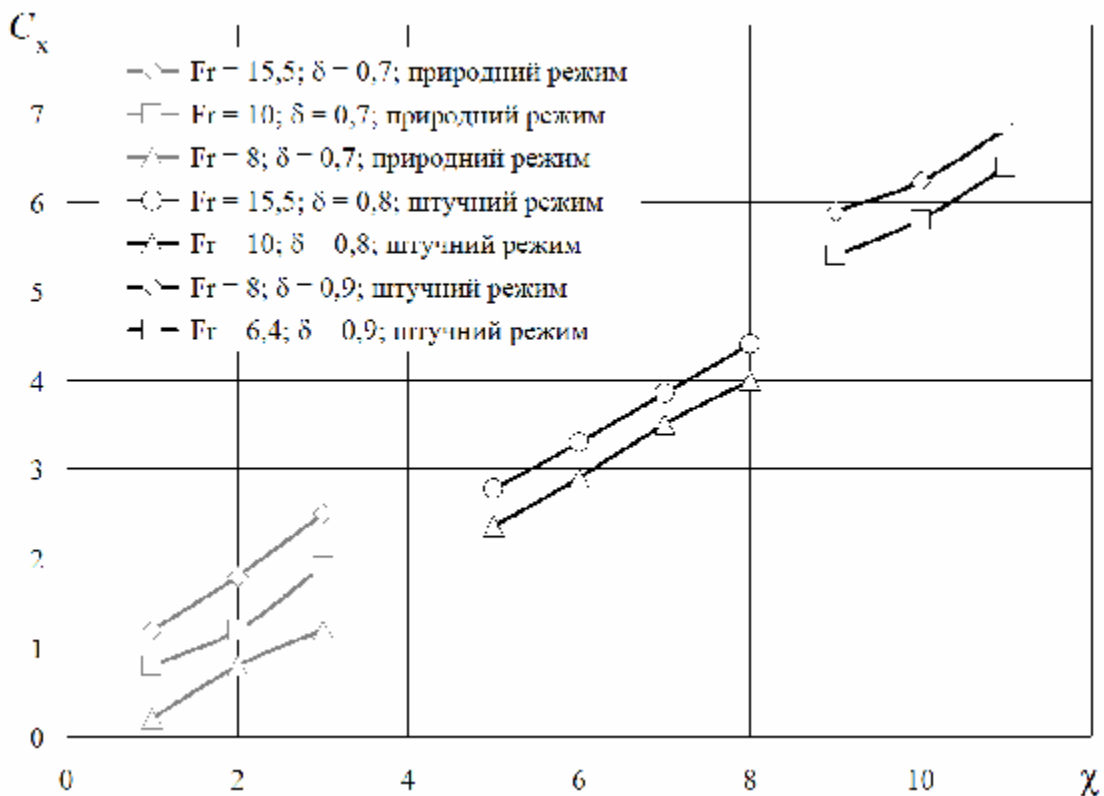


Рис. 5.12 – Залежності кавітаційного опору від числа кавітації, ступеня стиску потоку й числа Фруда

У режимах штучної кавітації, коли $\delta = 0,7...0,9$ і $Fr = 5...12$, зростання ступеня стиску збільшує кавітаційний опір. Із зростанням швидкості рідкої фази на вході до контактної камери, коли $Fr > 12$, спостерігається «замикання» труби.

Шляхом узагальнення експериментальних даних одержано емпіричне рівняння

$$C_x = 0,58\chi\delta^{1,4}Fr^{0,1}, \quad (5.16)$$

що є справедливим, коли $\chi = 1,9...12$, $\delta = 0,7...0,9$ і $Fr = 5...12$.

6 КАВІТАЦІЙНІ АПАРАТИ, ПРИЗНАЧЕНІ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Результати досліджень авторів та аналіз промислових впроваджень кавітаційних апаратів свідчать, що останні можна застосовувати для інтенсифікації технологічних процесів в різних галузях промисловості.

Кавітатори першого покоління

Щоб зменшити питомі енерговитрати на дегазацію рідини, можна, зокрема, запропонувати кавітаційний пристрій у вигляді крильчатки з клиновидною формою перерізу лопатей і тангенціальним сполученням робочої камери з емкістю (рис. 6.1) [128].

У крильчатці виконано канали, що виходять із тильного боку лопатей. Замкнення суперкаверни за межами лопатей крильчатки запобігає їхній ерозії. Профіль лопатей забезпечує мінімальні гідравлічні втрати.

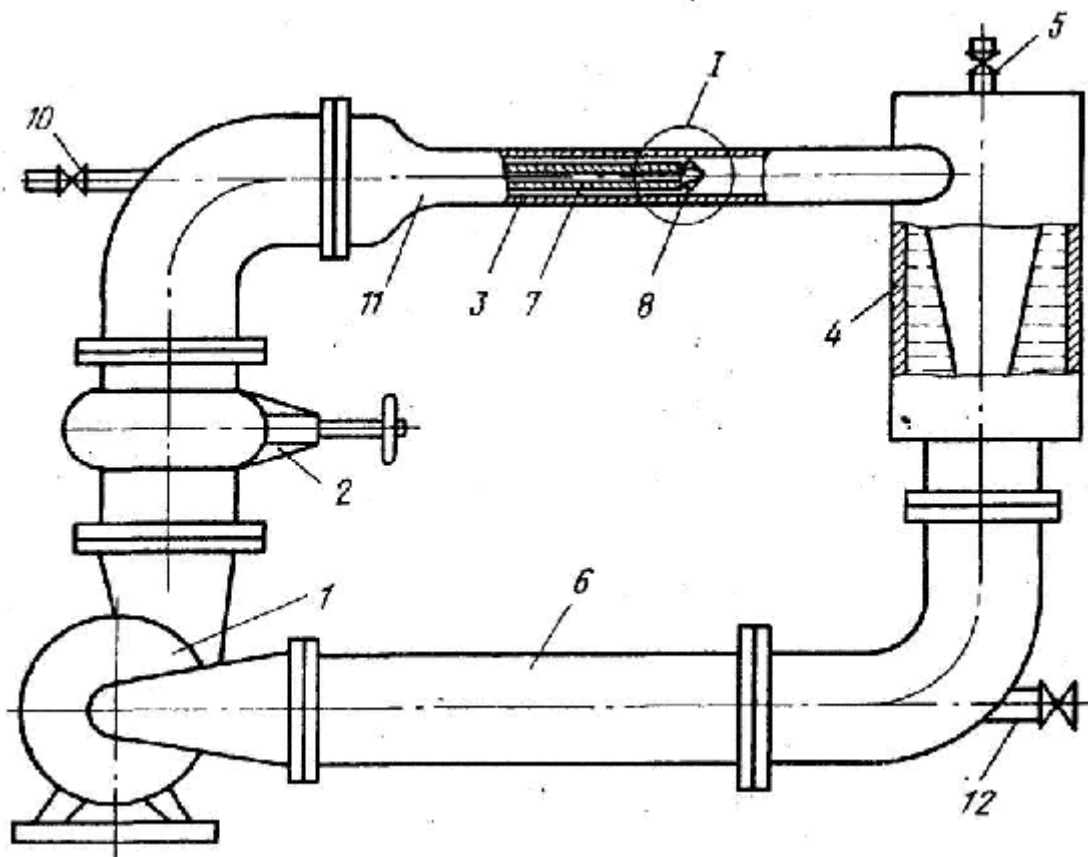


Рис. 6.1 – Пристрій для дегазації рідини [128]

У цьому пристрої відцентровий насос нагнітає рідину, що дегазується, крізь конфузор, де швидкість потоку сягає 8...10 м/с, а статичний тиск знижується до 0,01...0,02 МПа. На робочій ділянці створюються умови для утворення кавітаційної каверни за лопатями суперкавітаційної крильчатки.

Розчинені в рідині гази дифундують до каверни, звідки вони відводяться крізь кран 10 за допомогою вакуум-системи. Додатково дегазується рідина в емкості 4, сполученій тангенціально з робочою ділянкою, де роз-

ташовано крильчатку. В ємкості утворюється воронка, тиск в якій є нижчим, аніж тиск розчинених у рідині газів. Цей перепад тиску зумовлює дегазацію, при цьому газ із воронки відсмоктується за допомогою тієї ж вакуум-системи крізь кран 5.

Виконання кавітаційного елемента у вигляді суперкавітаційної крильчатки з клиновидною формою зрізу лопаті сприяє утворенню розвиненої поверхні кавітаційної каверни, розміри якої можна регулювати, змінюючи геометрію лопаті й гідродинаміку процесу. Завдяки цьому питомі затрати зменшуються в 1,5...2,0 раза, а ступінь дегазації зростає на 30 %.

Для збільшення поверхні дегазації рідини та інтенсифікації цього процесу в [129] запропоновано реалізувати в робочій зоні резонансні кавітаційні режими шляхом забезпечення додаткових поздовжніх коливань кавітаційного елемента (рис. 6.2).

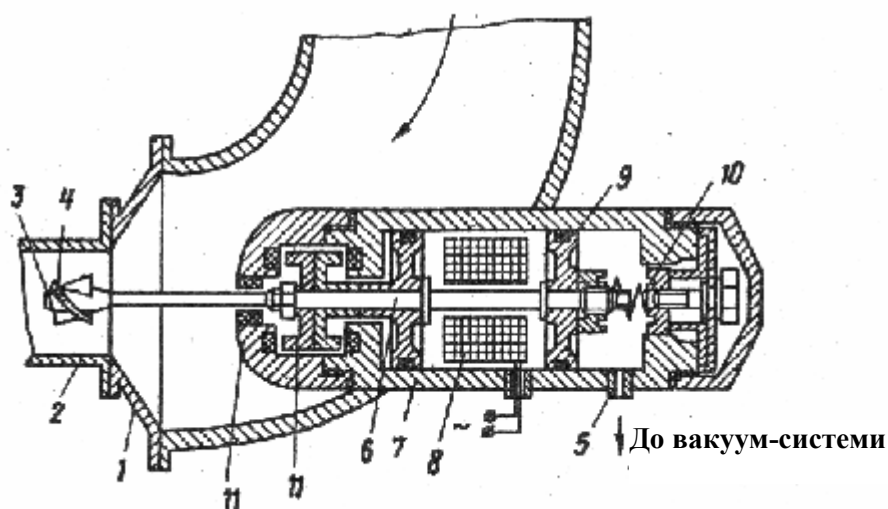


Рис. 6.2 – Пристрій для дегазації рідини [129]

Це досягається завдяки тому, що суперкавітаційну крильчатку закріплено на валу, приєднаному до привода поздовжніх коливань, що складається з електромагнітної котушки, амортизаційних механізмів та обмежувача амплітуди коливань. Співвідношення діаметрів крильчатки й робочої ділянки становить 0,20...0,73.

Рідину, що дегазується, крізь конфузور подають до робочої ділянки зі швидкістю 8...10 м/с. При омиванні крильчатки утворюється кавітаційна каверна. Розчинені в рідині гази дифундують у каверну, звідки вилучаються за допомогою вакуум-системи крізь отвори в крильчатці й валу. Завдяки приводові крильчатка коливається з частотою 8...100 Гц. Унаслідок резонансних ефектів, що виникають, коли частоти коливань крильчатки й хвостовика каверни збігаються, розміри каверни збільшуються в 1,5...2,0 раза. Пропорційно збільшується продуктивність пристрою. Амплітуда поздовжніх коливань вала визначається величиною електричного сигналу, що подають на електромагнітну котушку й регулюють за допомогою обмежувача амплітуди та амортизаційного механізму.

Описаний пристрій дозволяє оптимально регулювати продуктивність та енерговитрати дегазації завдяки геометрії крильчатки й зміненню частоти поздовжніх коливань.

Пристрій, наведений у [130], застосовують для дегазації, аерації стічних вод тощо. Він стабілізує кавітаційний режим оброблення стічної води та знижує питомі енерговитрати (рис. 6.3).

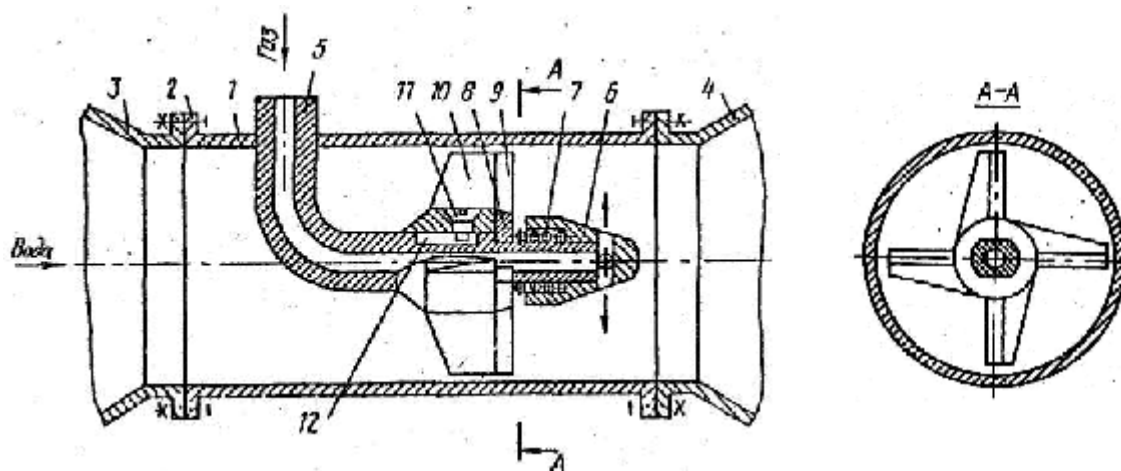


Рис. 6.3 – Кавітаційний аератор і крильчатка з інтерцептором в перерізі [130]

Пристрій складається з робочої камери 1 і коаксіального трубопроводу 5. Гайка 6 із порожниною для пружини 7 вільно накручується нарізкою трубопроводу 5. Пружина 7 притискає маточину 8 із жорстко закріпленими інтерцепторами 9 до напіврухомої крильчатки 10. У маточину крильчатки 10 вкручується гвинт 11 із проточкою на кінці циліндричної частини, який вільно входить у гвинтовий паз 12 трубопроводу 5. Завдяки цьому забезпечується можливість обмеженого повороту крильчатки на кут, величина якого визначається інтерцептором.

Під дією динамічного напору рідини й протидією механічного тиску від пружини 7, крильчатка 10 займає рівноважне фіксоване положення відносно інтерцепторів 9. Якщо витрата рідини зменшується й виникає загроза зриву кавітаційного режиму, під впливом некомпенсованої дії механічного тиску пружини 7 маточина 8 з інтерцепторами 9 і крильчаткою 10 зміщується вздовж трубопроводу 5. При цьому русі крильчатка 10 повертається відносно інтерцепторів 9. Прохідний зріз для потоку рідини зменшується, а швидкість потоку на лопатях крильчатки 10 зростає, що стабілізує режим кавітації. Із збільшенням витрати рідини інтенсивність кавітації зростає, і під дією динамічного тиску крильчатка займає нейтральне положення відносно інтерцепторів. У цьому випадку прохід рідини збільшується, а швидкість потоку та інтенсивність кавітації зменшується до вихідного значення. Процес аерації оптимізується, завдяки чому зменшуються питомі витрати енергії на очищення стічних вод.

Ефективність аерації в разі застосування пристрою становить 7,5 кг O_2 /кВт · год, що перевищує показник промислових аераторів на 25...30 %.

Для очищення стічних вод у режимі флотації в [131] запропоновано обертовий кавітаційний ежектор з отворами (рис. 6.4).

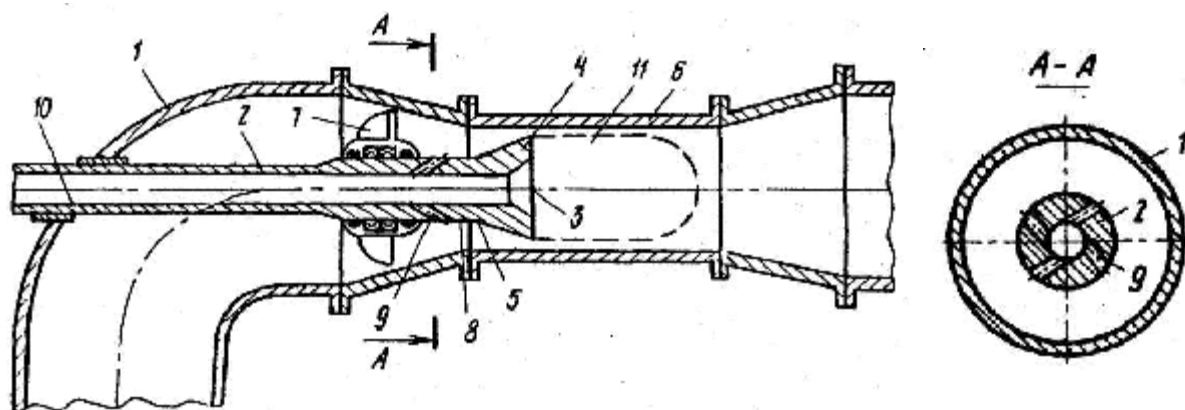


Рис. 6.4 – Кавітаційний ежектор [131]

Стічну воду подають у приймальну камеру 1. Вона, прискорюючись у конфузори 6, обертає крильчатку 7 з утворенням кавітаційних вихорів і бульбашок, оскільки до цієї частини крізь отвір 9 засмоктується повітря. Таким чином за обтічником 5 із мінімальними енергетичними витратами утворюється кавітаційна каверна 11. До зони зниженого тиску додатково ежектують повітря. У камері змішування 2 відбувається безперервне оновлення поверхні контакту фаз, що сприяє введенню газу в каверну.

Далі двофазна суміш потрапляє в дифузор, де завдяки кумулятивному ефектові стічна вода насичується газом. Одержану суміш спрямовують у флотаційну камеру під атмосферним тиском, де дрібні повітряні бульбашки барботують крізь рідину, виносячи забруднення в пінний шар. Шлам, що утворився, видаляють із флотаційної камери відомими засобами.

Коефіцієнт ежекції повітря становить при цьому 0,8...2,0, вміст завислих частинок зменшується на 90 %, БПК₅ і ХПК – на 80...85 %.

Кавітатори другого й третього покоління

Щоб посилити дію гідродинамічної кавітації на технологічне середовище, доцільно комбінувати її з іншими фізичними діями, що збільшують інтенсивність змикання кавітаційних бульбашок і подрібнюють великі порожнини, що відриваються від хвостовика кавітаційної каверни. Це особливо важливе для режимів штучної кавітації, коли тиск в каверні значно перевищує тиск насиченої пари рідини.

Такими діями є вібрації кавітатора чи корпуса реактора; гідравлічні пульсації; передкавітація; ударні хвилі від гідравлічних ударів на виході з реактора і такі, що виникають у потоці внаслідок досягнення дво- й трифазними сумішами надзвукових швидкостей руху в соплах і зазорах.

Реактори, в яких кавітацію поєднано з іншими фізичними діями, називають кавітаторами другого й третього покоління. Розглянемо їх із точки зору можливості застосування для інтенсифікації технологічних процесів.

Зокрема, кавітаційний змішувач, що використовує вимушені пульсації, кавітацію та ударні хвилі [132], дозволяє насичати стічні води значно більшим об'ємом окислювального газу, аніж відомі пристрої (рис. 6.5).

У змішувачі застосовано кавітатор-конус 3, в якому виконано отвори 4. Кавітатор закріплено на трубопроводі 6, з'єднаному золотниковим пристроєм із двома джерелами повітря різного тиску. Частота перемикання золотникового пристрою визначається сигналом від вимірювача тиску, установленого перед кавітатором. Змішувач додатково має сопло Лавалю 12, яке встановлене за кавітатором 3 на відстані 0,5...7,0 довжин його висоти. Пульсації повітря в кавітаційній камері, надають їй нестационарного характеру, а сопло Лавалю дозволяє уникнути коалесценції газових бульбашок завдяки утворенню ударних хвиль у рідині.

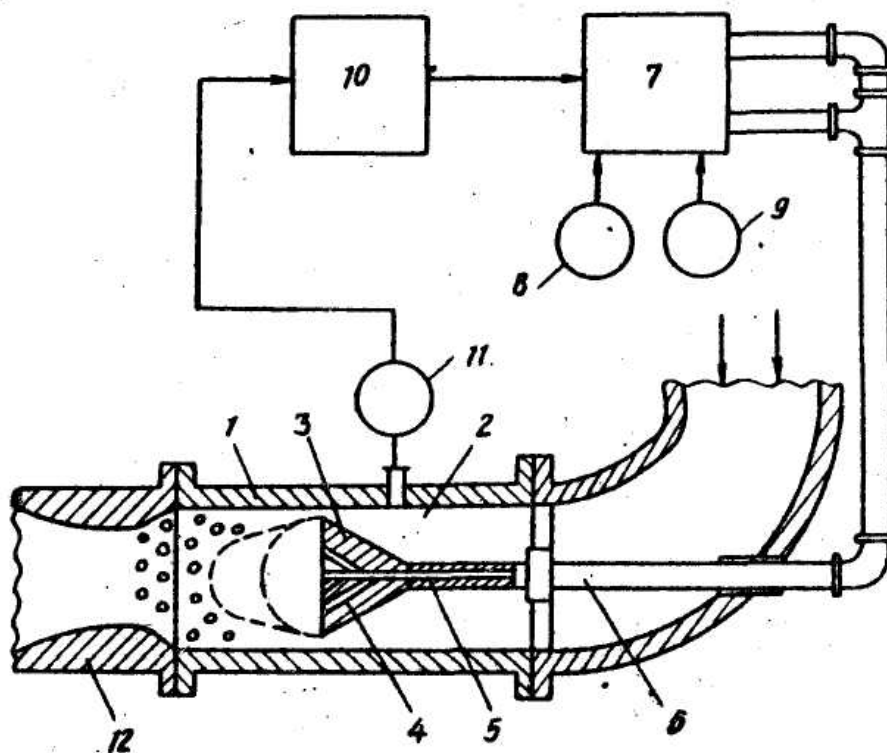


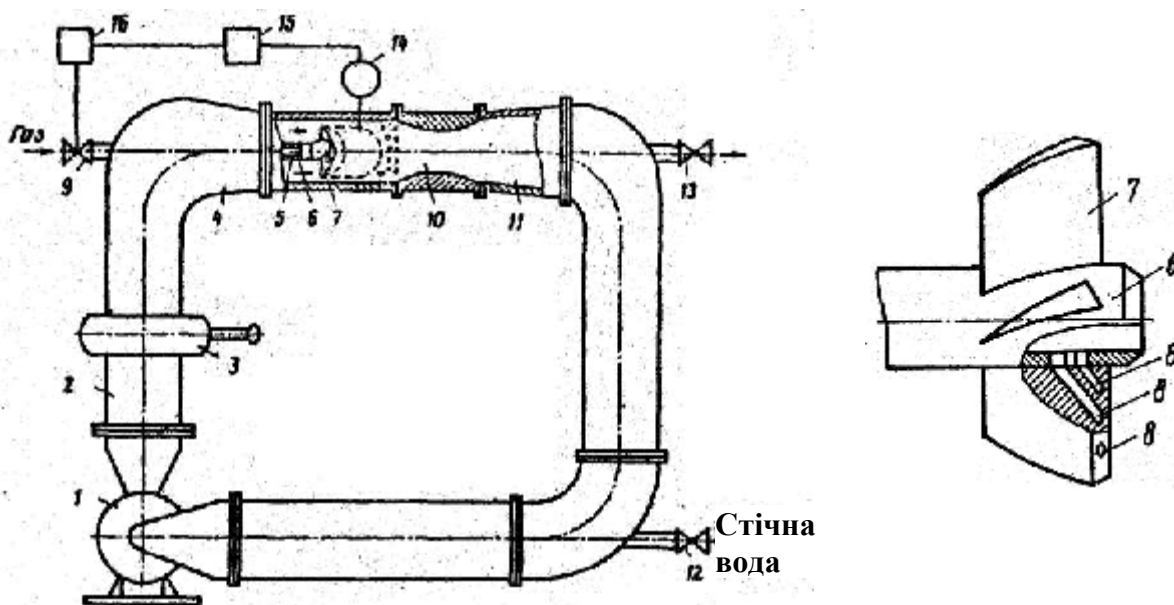
Рис. 6.5 – Кавітаційний змішувач [132]

Завдяки такій конструкції вдається насичати рідину 3...4 відносними об'ємами окислювального газу та одержувати перед фотокамерою потік газу високої дисперсності.

У [133] запропоновано спосіб окислення стічних вод у реакторі з циркуляційним контуром із застосуванням кавітаційного аератора проточного типу (рис. 6.6).

Його роботу організовано так. Циркуляційним насосом 1 стічну воду трубопроводом 2 крізь конфузор 4 подають у проточну камеру, де при омиванні крильчатки 7 утворюється кавітаційна каверна. Крізь порожистий вал 6 і канали в лопатях 7 повітря пульсаційно ежектують у каверну, надаючи їй нестационарного характеру. На виході з проточної частини утворюється двофазна суміш, що складається з кавітаційних і газових бу-

льбашок. Унаслідок пульсацій каверни частина кавітаційних бульбашок (25 %) змикається, і кумулятивні струмені руйнують газові бульбашки.



- 1 – циркуляційний насос; 2 – трубопровід; 3 – регулювальний кран; 4 – конфузор;
 5 – проточна камера; 6 – порожнистий вал; 7 – кавітаційна крильчатка; 8 – канали;
 9 – електрична засувка; 10 – сопло Лавалю; 11 – дифузор; 12 і 13 – крани

Рис. 6.6 – Пристрій для окислення стічних вод і крильчатка [133]

Окислювальні радикали й кисень повітря переходять із бульбашок у стічну воду й реагують. Далі двофазну суміш спрямовують у сопло Лавалю.

Відомо, що з досягненням надзвукової швидкості за чисел Маха $Ma = V/V_{зв} > 1$ (де V і $V_{зв}$ – швидкості потоку й звуку в рідині, насиченій кавітаційними бульбашками, м/с) у потоці виникають ударні хвилі. За атмосферного тиску в зазорі швидкість звуку, коли коефіцієнт повітреутримання $\alpha = 0,5$:

$$V_{зв} = \sqrt{\frac{P}{\rho_p(1-\alpha)\alpha}} = \sqrt{\frac{10^5}{1000 \cdot (1-0,5) \cdot 0,5}} = 20 \text{ м/с,}$$

а за тиску 0,005 МПа – 4,5 м/с. Такої швидкості реально досягти в робочій частині реактора. Ударні хвилі подрібнюють великі газові утворення, що відриваються з хвостовика каверни, і дрібнодисперсна суміш бульбашок і технологічного середовища надходить у дифузор.

Швидкість потоку зменшується з одночасним підвищенням тиску, що сприяє остаточному змиканню кавітаційних і газових бульбашок та ефективному окисленню органічних забруднень. Найкращим є діапазон роботи кавітаційного аератора за чисел кавітації 0,25...1,20, частоти пульсацій 10 Гц і тривалості оброблення 5 хв. Швидкість потоку рідини змінюється при цьому в межах 5...25 м/с.

Для нагрівання рідини і знешкодження газів, що забруднюють атмосферу, можна застосовувати контактний теплообмінник, який складається

з корпусу 1, конфузора 2 і дифузора 3 (рис. 6.7) [134]. У корпусі 1 коаксіально й послідовно за рухом потоку розташовано газові кавітаційні патрубки 4 і 5, що утворюють із стінками корпусу 1 кільцеві зазори 6 і 7, і які виконані у вигляді дифузорів 8 і 9. У другому за напрямом руху потоку кавітаційному патрубку 5 розташовано пальник 10 із патрубком подачі палива й запальник 12, наприклад, електричний.

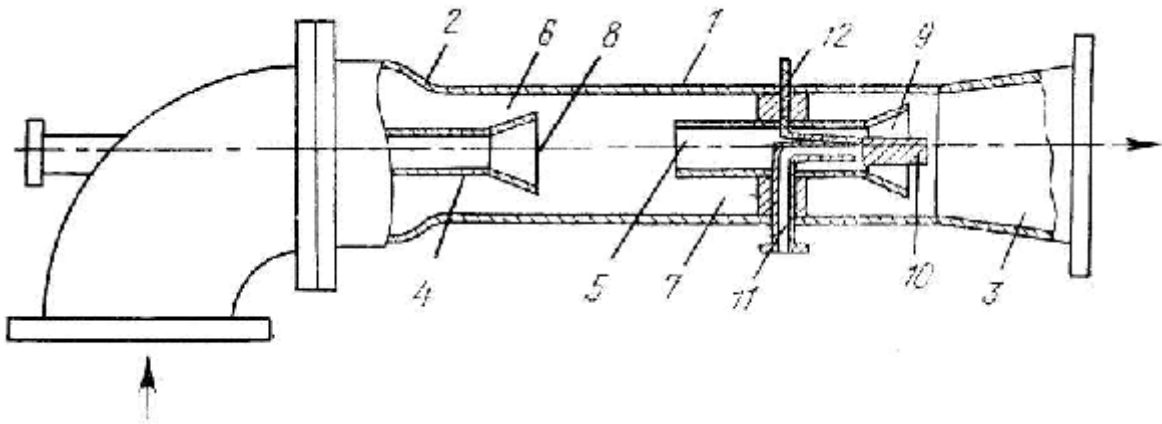


Рис. 6.7 – Контактний теплообмінник [134]

Контактний теплообмінник працює так. Рідину з температурою 15...20 °С під тиском 2,0...2,5 МПа подають у корпус 1 крізь вхідний конфузور 2. Швидкість рідини в зазорі зростає до 20 м/с. Газ, який треба знешкодити, подають до газового кавітаційного патрубка 4. У потоці рідини утворюється штучна каверна. Змінюючи вхідну швидкість рідини й витрату газу, досягають таких розмірів каверни, коли вона замикається на вхідній частині патрубка 5. Потім подають газорідинне паливо крізь патрубок 11 і запалюють пальник 10. Під час контактування продуктів згоряння газу з рідиною відбувається інтенсивний теплообмін, унаслідок чого температура рідини підвищується до 90...95 °С. Її можна спрямувати на обігрів приміщень чи використовувати для технологічних потреб.

Апробацію засобу дегазації на режимах штучної кавітації здійснено на Череповецькому НВО «Азот» для видалення аміаку зі стічних вод цеху з виробництва біфториду, фториду амонію [135].

Кавітаційний дегазатор (рис. 6.8) складається з циркулярного насоса 1, трубопроводу з регулювальним краном 2, підвідного патрубка 3 і першого кавітаційного модуля 4 із кавітаційним соплом із гострою кромкою, розташованим коаксіально на вході в циліндричний канал 5, який перфоровано на довжину 14...20 діаметрів. За першим модулем розташовано другий, вихід якого тангенціально приєднано до резервуара низького тиску 5. Газовідвідний патрубок 7 першого модуля приєднано до вакуум-системи 8, а газовідвідний патрубок 9 другого з'єднано з атмосферою.

Визначено оптимальний режим роботи апарата, за якого вміст аміаку в стічній воді зменшується на 93 % за кратності циркуляції 4. Вилучений

аміак використовували для виробництва аміачної води. У табл. 6.1 наведено результати експериментальних досліджень режимів дегазації.

Таблиця 6.1 – Результати експериментальних досліджень кавітаційної дегазації

Параметри	Серія дослідів						
	1	2	3	4	5	6	7
Швидкість потоку рідини, м/с	24,5	23,4	20	18	15	18	18
Число кавітації першого модуля	0,3	0,4	0,75	1	1,6	1	1
Число кавітації другого модуля	0,13	0,2	0,35	0,6	1,6	1	1
Коефіцієнт ежекції	1	2	3	4	5	2	0,6..1,5
Показник рН	10,5	10,5	10	9,5	9	9,5	9,5
Ступінь дегазації стічної води, %	65	90	93	93	70	63	50
Питомі енергетичні витрати	0,2	0,09	0,065	0,05	0,05	0,065	0,065
Співвідношення площин циліндричного каналу й кавітаційного сопла	2	3	4	5	6	4	4
Довжина циліндричного каналу, м	18	18	18	18	18	13	21

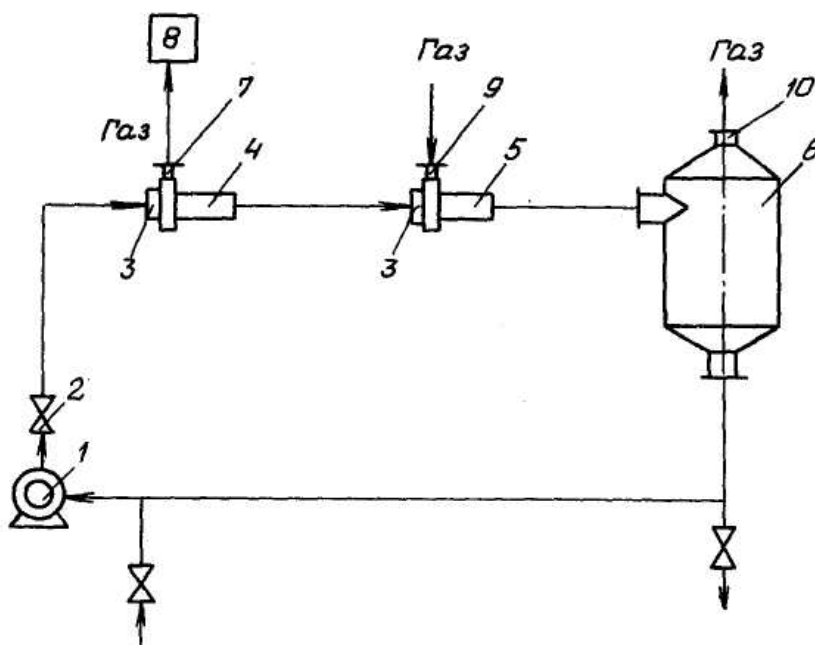


Рис.6.8 – Технологічна схема кавітаційного дегазатора [135]

Для визначення оптимальних режимів кавітаційної дегазації для очищення стічної води від аміаку на цьому ж пристрої порівняно інші способами дегазації (табл. 6.2). Установлено, що вони знижують вміст аміаку на 50 % за 6...10-кратного циркулювання стоку. Вентилування стічної води повітрям на режимах штучної кавітації за тієї ж кратності циркуляції підвищувало ефективність видалення аміаку до 93 %.

Таблиця 6.2 – Результати експериментальних досліджень кавітаційної дегазації

Спосіб дегазації	Кратність циркуляції	Питомі енерговитрати, кВт · год/м ³	Залишковий вміст аміаку, мг/л
Без вилучення аміаку	6	0,09	500
Із вентилуванням повітрям	4	0,09	70

У праці [136] вирішено задачу створення високоефективного способу оброблення технологічного потоку рідини, що запобігає появі великих парогазових порожнин і сприяє утворенню каліброваних дрібних за розміром бульбашок високоефективної кумулятивної дії. Це особливо важливо при очищенні стічних вод, оскільки кавітаційна каверна, що вентилюється газом, безперервно виносить газові різнорозмірні бульбашки вихоровими шнурами [7].

Цю задачу розв'язують шляхом: здійснення послідовно за потоком операцій з утворення кавітаційної каверни; пульсаційної подачі газової фази в каверну й технологічний потік, чи відсмоктуванні парогазу з каверни; калібрування кавітаційних і газових пухирців при русі парогазу калібрувальними каналами; утворення суміші каліброваних бульбашок з основним технологічним потоком; генерування ударних хвиль пропусканням суміші рідини й газу крізь сопло Лавалю; подрібнення кавітаційних каверн вібруванням кавітаційної системи й пульсаціями технологічного потоку; змикання кавітаційних бульбашок у потоці в зоні підвищеного тиску накладанням гідроударів на потік чи створенням флотаційного ефекту за багаторазового розширення й стиснення потоку. Виконання цих операцій дозволяє зменшити кратність циркуляції рідини в реакторі й досягти потрібного ефекту без збільшення питомих енерговитрат.

У пристрої технологічна суміш унаслідок раптового звуження й розширення потоку набуває надзвукової швидкості, за якої в потоці утворюються ударні хвилі, що посилюють ефект від змикання кавітаційних бульбашок. Швидкості потоку в зазорі становлять 4,5...20,0 м/с, а швидкість руху потоку на вході в реактор може бути зменшена до 1...5 м/с. Це дозволяє знизити питомі енерговитрати на кавітаційне оброблення.

Вібратор створює періодичні коливання поздовжньої осі реактора, і кавітаційні каверни, утворені за кавітатором і передкавітатором, інтенсивно руйнуються, газова фаза змішується з технологічним потоком, і додатково утворюються кавітаційні бульбашки.

Пульсатор надає примусових коливань каверні, утвореній за передкавітатором, шляхом пульсаційного нагнітання порції повітря чи, наприклад, обертанням перфорованого диска з кутовою швидкістю 0,5...1,0 с⁻¹. Завдяки цьому в потоці на вході до циліндричної камери генерується газорідинна суміш із маленькими бульбашками, що полегшує створення кавітаційної каверни за передкавітатором, надаючи їй нестационарного характеру.

Також на виході реактора встановлено генератор гідроударів, який створює високий тиск на виході з реактора, що дає змогу досягти майже повного змикання газових і кавітаційних бульбашок. Генератором гідроударів може бути, наприклад, переривник потоку або кран, шток якого рухається за копіром із провалом чи розривом.

Усі ці чинники дозволяють підвищити ефективність роботи реактора вдесятеро без суттєвого зростання енерговитрат.

7 УДОСКОНАЛЕННЯ БАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСАД ВИРОБНИЦТВА ПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ

У цьому розділі проаналізовано аспекти удосконалення базових технологічних засад виробництва паливних сумішей на основі ріпакової олії з використанням гідродинамічної кавітації. Зокрема, висвітлено питання, пов'язані з особливостями світової практики використання ріпакової олії для виробництва біопалива, описано існуючі технологічні засади виробництва біодизельного палива кавітаційними методами й напрямки їх удосконалення, а також проаналізовано технічні й технологічні кавітаційні засоби компанії «БіоСам».

7.1 Світова практика використання ріпакової олії для виробництва біопалива

Технологію виробництва біодизельного палива, що передбачає використання, зокрема, ріпакової олії [88-91], вдосконалюють у багатьох країнах. Сучасні дизельні двигуни були розроблені з розрахунком на використання дизельного палива, що має певні фізичні та хімічні властивості.

Для переходу на інші види палива з відмінними фізичними характеристиками виникає потреба в розв'язанні таких проблем: максимальне наближення потрібних властивостей нового палива до властивостей традиційного палива; модернізація існуючих двигунів для їх пристосування до роботи на паливі, що має специфічні властивості.

Усе це стосується і всіх видів палива, виробленого з насіння олійних культур. Орієнтуватися на двигуни, що будуть працювати виключно на біопаливі, недоцільно. Характеристики двигунів мають забезпечувати можливість комбінованого використання біопалива та традиційного дизельного палива.

Сьогодні існує декілька основних технологій використання в дизельних двигунах різних видів палива, виробленого з насіння ріпаку, а саме: використання біопалива на базі необробленої холоднопресованої олії з насіння ріпаку як без присадок, так і з присадками, а також застосування ріпакового метилового ефіру, кожна з яких має як переваги, так і недоліки, що аналізуються нижче.

Необроблена холодно-пресована олія з насіння ріпаку як біопаливо

Таку олію можна одержувати, наприклад, із застосуванням статичних та динамічних змішувачів [91]. Значно вища температура кипіння складових ріпакової олії у порівнянні з дизельним паливом вимагає, щоби процес підготовки суміші “паливо–повітря” відбувався при більш високих температурах. Двигуни старого покоління, обладнані передкамерою зго-

ряння, деякою мірою відповідають таким вимогам, бо створюють більш сприятливі умови ніж ті, що мають місце в сучасних двигунах.

Двигуни прямого вприскування мають камеру згоряння, інтегровану до поршня. При використанні палива рослинного походження головку поршня і, відповідно, камеру згоряння виготовляють з високоякісного чавуну для забезпечення можливості досягнення відповідних температур. Проте така практика означає істотний відхід принципу конструкції у порівнянні зі стандартними дизельними двигунами.

Щоб обмежити термічні напруження в складових поршня та головки циліндра, виникає додаткова потреба у використанні турбонагнітача відпрацьованих газів, а також системи проміжного охолодження.

Ці особливості конструкцій взяті лише кількома виробниками ФРН.

Додаткове ускладнення впливає з факту виключно високої в'язкості ріпакової олії, яка приблизно в 15 разів перевищує відповідний показник дизельного палива. Це означає, що система вприскування палива має бути певним чином модифікована. Оскільки ріпакова олія відрізняється порівняно високою температурою твердіння (на рівні мінус 2 °С) виникає потреба у впровадженні додаткової системи підігріву. Тільки після цього забезпечуватиметься можливість подачі палива в систему низького тиску.

Застосування для живлення дизельних двигунів ріпакової олії холодного пресування з присадками

Можливо одержати паливо, що буде придатним для використання в двигунах усіх поколінь без будь-якої їх переробки, шляхом змішування 20 % етанолу, 25 % могазу та 55 % холодно-пресованої фільтрованої ріпакової олії. Такі суміші виробляє німецька компанія Tessel Stuttgart.

Хоча в'язкість паливної суміші все ще значно перевищує в'язкість звичайного дизельного палива, а її цетанове число при цьому нижче ніж у необробленої ріпакової олії, властивості суміші щодо кипіння дозволяють наблизити процес приготування суміші паливо–повітря до відповідного процесу в традиційних дизельних двигунах. Таким чином, при низьких температурах в'язкість цієї паливної суміші менша, ніж у необробленої ріпакової олії, що знижує точку закупорювання холодного фільтру на 20 °С.

Вищезгадана паливна суміш широко випробувалась у дизельних двигунах з передкамерою згоряння та у двигунах прямого вприскування німецькими технічними університетами Штутгарту, Кайзерслаутерну та Хохенхайну, а також Технічним контрольним департаментом Баварії. Але параметри довгострокового використання, що спираються на великомасштабні випробування в реальних умовах, ще мають бути підтверджені.

Застосування ріпакового метилового ефіру

Масштабні дослідження ріпакового метилового ефіру здійснювали, зокрема, в Австрії, Франції та Італії. Важлива перевага цього виду палива полягає в тому, що відпадає потреба в структурних змінах стандартних ди-

зельних двигунів. Існує лише один аспект, вартий уваги: через агресивну активність метилового ефіру всі прокладки, діафрагми та елементи ущільнення, які знаходяться у прямому контакті з паливом, мають бути виготовлені зі стійких матеріалів.

Тим часом західноєвропейські виробники дизельних двигунів гарантують можливість використання метилового ефіру в машинах свого виробництва. Що стосується двигунів, в яких заздалегідь використання метилового ефіру не передбачалось, то при переході на цей вид палива вони потребують лише незначних змін в обладнанні.

Особливості поводження з метиловим ефіром практично такі ж самі, як при застосуванні дизельного палива. Єдиним недоліком метилового ефіру, що заслуговує на увагу, є підвищення на 3 °С температури розкладання у порівнянні з традиційним дизельним паливом.

Що стосується робочих характеристик дизельних двигунів при роботі на трьох вищезгаданих типах палива, то було узагальнено такі результати випробувань:

а) якщо система впорскування налагоджена на використання дизельного палива, а двигун працює на ріпаковому біопаливі, зареєстровано погіршення робочих характеристик на 5...10 %;

б) порівняно з роботою на звичайному дизельному паливі питоме споживання ріпакового палива зростає на 10 %;

в) викиди відпрацьованих газів при переході на ріпаковий метиловий ефір знижуються на 50 % при максимальному навантаженні, хоча викиди твердих частинок зменшуються лише на 20 %. Викиди оксиду вуглецю та вуглеводнів зменшуються незначно, зміни щодо оксидів азоту при цьому не спостерігається. Оскільки види ріпакового палива не містять сірки, немає її і у відпрацьованих газах. Це є позитивним фактором, який сприяє використанню окислювальних каталізаторів.

Характеристики окремих видів палива наведено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Властивості ріпакового й традиційного палива

Паливо	Густина, кг/м ³	В'язкість при 20°C мм ² /с	Цетанове число	Точка займання, °С	Точка закупорювання холодного фільтра, °С	Теплотворна здатність, МДж/кг
Традиційне дизельне паливо	834	4–6	50	80	–11,0	46,4
Ріпакова олія	922	74	44	317	+15,0	39,5
Суміш Tessel	898	32	39	–	–5,5	39,4
Ріпаковий метиловий ефір	882	6–8	48	>100	–8,0	40,0

Таким чином, є актуальним удосконалення базових технологічних засад виробництва біодизельного палива для подальшого його промислового використання у дизельних двигунах, що передбачає, зокрема, одер-

жання ріпакової олії екструзійним способом, гідродинамічну активацію паливних сумішей на основі нафтового палива і ріпакової олії, визначення фізичних властивостей активованих сумішей та дослідження роботи дизельного двигуна на активованих сумішах.

7.2 Аналіз існуючих технологічних засад виробництва біодизельного палива кавітаційними методами

З практики експлуатації дизельних двигунів та літературних джерел відомо, що для живлення дизелів використовують суміші нафтопродуктів та рослинних олій. Якість такого палива можна значно підвищити, якщо досягти високого ступеня гомогенності та активації сумішей. Одним з шляхів досягнення поставленої мети є, зокрема, обробка паливної суміші в гідродинамічному кавітаційному полі [100].

Це обумовлено насамперед тим, що російськими і зарубіжними дослідниками [54, 55, 92-99] пропонуються різні способи і технології, що дозволяють змінювати фізико-хімічні параметри нафтових паливних продуктів, збільшити вихід світлих нафтопродуктів при перегонці нафти.

Впливати на кінетику процесів переробки нафти і нафтопродуктів можна хімічними речовинами (каталізаторами, поверхнево-активними речовинами - ПАВ, присадками і так далі) і фізичними полями (тепловими, кавітаційними, електромагнітними і так далі). Унаслідок такого втручання змінюється радіус ядра і товщина адсорбційно-сольватної оболонки складної структурної одиниці, яка є елементом нафтової дисперсної системи. Дія на нафту і її залишки за допомогою хімічних речовин призводить до прискореного зносу технологічного устаткування і є складно регульованим процесом.

У цей час особливу увагу багато дослідників приділяють методам інтенсивної обробки нафти і нафтопродуктів з метою збільшення виходу світлих фракцій при її перегонці, зниження вмісту сірки, зменшення в'язкості і так далі. В основі технологій, що використовують дію *кавітації* на нафту і нафтопродукти, лежить метод імпульсної енергетичної дії за рахунок акустичних хвиль і кавітації [94-96], що вносять зміни до гідродинаміки і дисперсійної стабільності рідких середовищ, який впливає на різні механізми процесу – помітно інтенсифікує одні (деструкцію) і різко уповільнює інші (коксоутворення).

Енергетична дія на нафту й нафтопродукти дозволяє збільшити вихід легколетких фракцій при її перегонці. Застосовуючи імпульсну енергетичну дію, із важкої нафти можна отримати 20...30 % бензину, 40...50 % дизельного палива, 20...30 % мазуту, бітуму та інших товарних продуктів.

Обробка кавітацією прискорює дифузю нафти в порожнині парафіну, інтенсифікує процес його руйнування. Прискорення розчинення парафіну йде за рахунок інтенсифікації перемішування нафти на межі нафта-парафін і дії імпульсів тиску, який диспергує частинки парафіну. Кавітація руйнує

зв'язки між окремими частинами молекул, впливає на зміну структурній в'язкості.

Під впливом кавітації великої інтенсивності впродовж тривалого часу порушуються С-С зв'язки в молекулах парафіну, унаслідок чого відбуваються зміни фізико-хімічного складу (зменшення молекулярної ваги, температури кристалізації і ін.) і властивостей нафтопродуктів (в'язкість, щільність, температури спалаху і ін.) [92-97].

Для розриву зв'язків в молекулах вуглеводневих сполук необхідно забезпечити на складну багатокомпонентну систему, якою є нафта і нафтопродукти, багатофакторну енергетичну дію в імпульсній формі. Така дія реалізується в роторних імпульсних апаратах (PIA) [98].

Енергія дисоціації зв'язку С-Н коливається залежно від молекулярної маси і структури молекули, в межах 322...435 кДж/моль, енергія дисоціації зв'язку С-С – 250...348 кДж/моль [99]. При розриві зв'язку С-Н від вуглеводневої молекули відривається водень, при розриві зв'язку С-С – вуглеводнева молекула розривається на дві нерівні частини.

При обробленні вуглеводневої сировини кавітацією відбувається деструкція молекул, спричинена мікрокрекінгом молекул та іонізацією.

Унаслідок цих процесів в системі накопичуються «активовані» частинки: радикали, іони, іонно-радикальні утворення [96]. PIA використовують для оброблення систем рідина–рідина, рідина–тверде і газ–рідина завдяки:

- механічній дії на частинки гетерогенного середовища, що полягає в ударних, зрізаючих і стираючих навантаженнях і контактах з робочими частинами PIA;

- гідродинамічній дії, що виражається у великій зсувній напрузі в рідині, розвиненій турбулентності, пульсаціях тиску і швидкості потоку рідини;

- гідроакустичній дії внаслідок пульсацій тиску, інтенсивній кавітації, ударним хвилям і нелінійним акустичним ефектам.

7.3 Удосконалення технологічних засад виробництва біодизельного палива кавітаційними методами

Біодизельне паливо одержували на установці, принципову схему та елементну базу якої наведено на рис. 7.1 і 7.2.

Ця установка працює так. В ємкість E_1 заливають стандартне дизельне паливо, а в ємкість E_2 – ріпакову олію. Запускають насос Н. При роботі установки клапани Z_1 і Z_6 закриті, клапани Z_2 , Z_7 , Z_8 мають ступені відкриття, що забезпечують необхідне співвідношення нафтового палива та ріпакової олії. Вентиллями Z_3 , Z_4 регулюють перепад тиску в гідродинамічному активаторі (ГА), що забезпечує встановлене технологічним регламентом число кавітації.

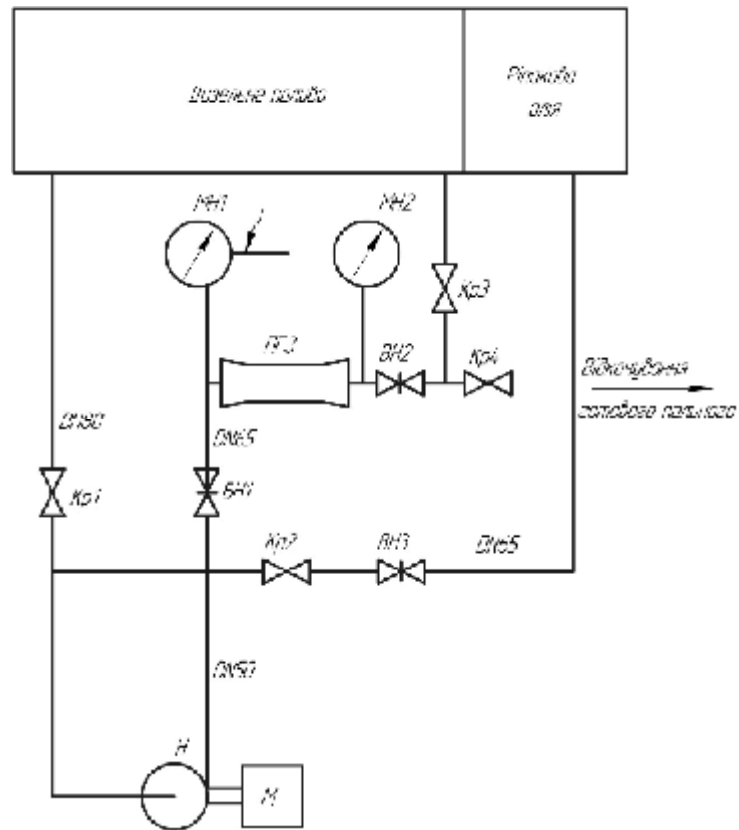


Рис. 7.1 – Принципова схема установки для виробництва паливних сумішей

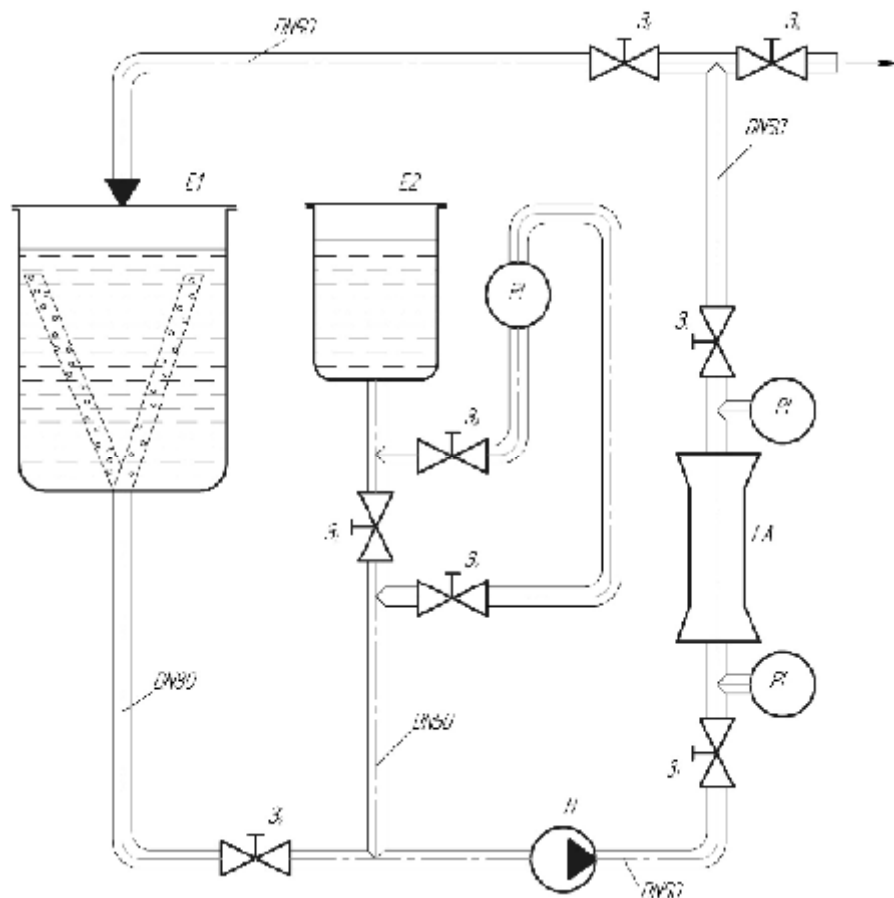


Рис. 7.2 – Схема експериментального стенду для виробництва паливних сумішей

Після спорожнення ємкості E_2 клапани Z_7, Z_8 перекривали, і суміш протягом необхідного часу циркулювала в системі крізь ємкості E_1 . Можливий варіант, коли попередньо змішані нафтове паливо та ріпакова олія заливають в ємкість E_1 . Перфоровані патрубки, встановлені в ємкості E_1 , призначено для відбору суміші на активатор за всією висотою одночасно.

7.3.1 Дослідження властивостей біопаливних сумішей

Фізичними й фізико-хімічними методами вивчено властивості паливних сумішей із об'ємною часткою ріпакової олії 10, 20, 30 і 40 %, оброблених у кавітаційному полі (табл. 7.2). Для контрольних дослідів також використовували чисте дизельне паливо.

Вологість дизельного палива й ріпакової олії визначали за методом Дюлонга і Пті. Установлена відсутність вологи в дослідних зразках. Ці результати також підтверджено даними дериватографічних досліджень.

Вивчено залежність температури спалаху від концентрації ріпакової олії. Установлено, що із збільшенням вмісту олії (важкої фракції) температура спалаху палива зменшується й за об'ємної частки олії 40 % становить 56...60 °С. При цьому ріпакова олія в інтервалі температур 2...180°C не має температури спалаху. За температур 150 і 170°C спостерігається ендотермічний ефект із градієнтом температури 3 °С, хоча термогравіметричні дослідження не дозволили його конкретизувати.

Таблиця 7.2 – Властивості паливних сумішей після гідрокавітаційного оброблення

Об'ємна частка олії, %	Температура спалаху, °С	В'язкість, 10^{-3} Па · с, за температури, °С					
		-10	0	25	35	45	55
0	54	7,08	6,31	3,52	2,73	2,21	1,83
10	87	10,47	8,13	4,68	3,63	2,88	3,34
20	68	14,79	11,48	6,13	4,76	3,76	3,00
30	68	20,42	15,85	8,51	6,31	4,90	3,89
40	55–60	28,84	21,88	11,22	8,32	6,38	5,01
100	150, 170*	229,09	154,88	65,62	44,04	30,78	22,27

Вологість усіх сумішей за Дюлонгом і Пті – 0.

* Ендоефект (градієнт температури 3 °С)

В інтервалі температур від мінус 10 до плюс 55 °С досліджено в'язкість сумішей (рис. 7.3 і 7.4). Установлено, що залежність в'язкості сумішей від температури в логарифмічних координатах має прямолінійний характер. Уведення в стандартне дизельне паливо ріпакової олії, в'язкість якої є на порядок вищою, аніж в'язкість дизельного палива, при змінненні концентрації від 1 до 40 % незначно впливає на в'язкість суміші.

Аналіз наведених результатів дає підставу зробити висновок про перспективність роботи дизельного двигуна на паливній суміші, обробленій гідрокавітацією.

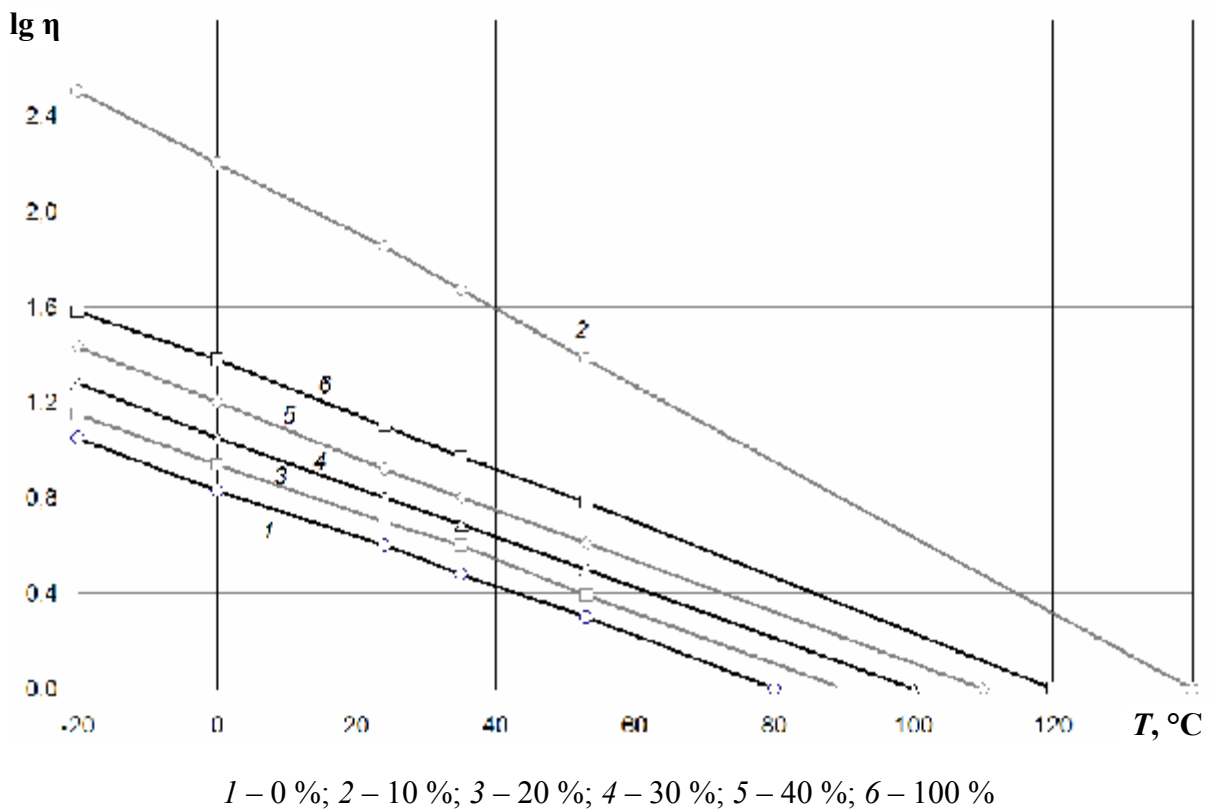


Рис. 7.3 – Залежність в'язкості η суміші від температури за різних концентрацій ріпакової олії

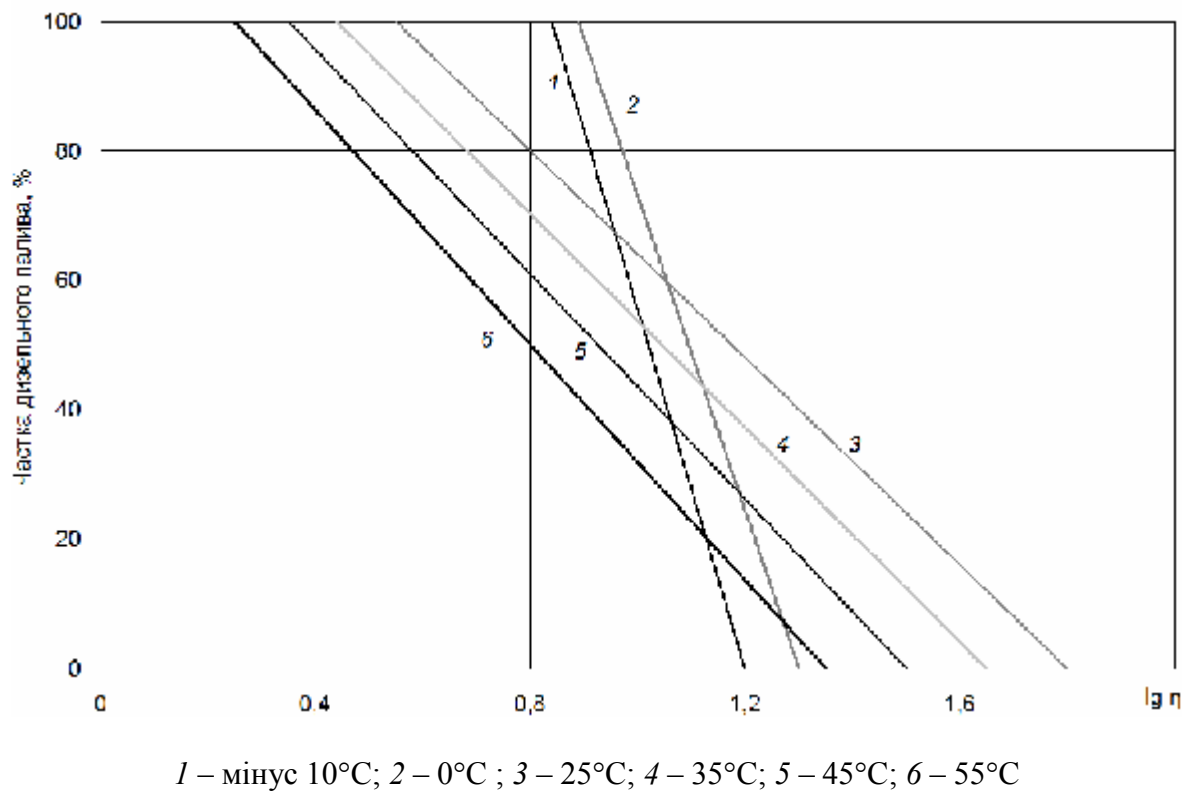


Рис. 7.4 – Залежність в'язкості паливної суміші від умісту дизельного палива за різних температур

Про доцільність застосування гідрокавітації для одержання паливних сумішей свідчать і результати досліджень оброблення в РІА вакуумного газойля [54]. Їхньою метою було зниження в'язкості суміші газойля зі світлими нафтопродуктами (зокрема, «літнім» дизельним паливом і гасом) із утриманням температури спалаху в заданих межах. Суміші готували шляхом імпульсного багатofакторного оброблення газойля з доданими в заданій кількості «літнім» дизельним паливом та/чи гасом. Газойль та його суміші обробляли в циклічному режимі, відбираючи проби, які термостатували, а потім визначали їхні кінематичну в'язкість, густину й температуру спалаху в закритому тиглі (табл. 7.3). Для цього використовували прилади ВПЖ-2 ГОСТ 10028-81, АНТ-1 ГОСТ 18481-81 і ТВЗ-ПХП ГОСТ 6356.

Таблиця 7.3 – Параметри паливних сумішей за різних концентрацій газойля, дизельного палива й гасу

Вміст легких компонентів в газойлі	В'язкість при 40 °С, мм ² /с	Температура спалаху, °С	Густина при 40 °С, кг/м ³
20 % дизельного палива	21	100	878
25 % дизельного палива	16	92	880
30 % дизельного палива	14	80	870
35 % дизельного палива	13	83	872
40 % дизельного палива	10	78	867
10 % дизельного палива і 15 % гасу	13	55	872
5 % дизельного палива і 15 % гасу	16	70	876
10 % дизельного палива і 10 % гасу	16	75	879
15 % дизельного палива і 5 % гасу	18	80	880
15 % дизельного палива і 10 % гасу	13	65	875
20 % дизельного палива і 10 % гасу	12	65	870
20 % гасу	14	69	873
15 % гасу	18	70	875
10 % гасу	23	80	879

Таким чином, можна зробити висновок про те, що імпульсна багатofакторна обробка газойля в РІА сприяє зменшенню як в'язкості (на 1...2 мм²/с), так і температур спалаху (на 4...6 °С).

Аналогічні якісні результати одержано при експериментальних дослідженнях імпульсної багатofакторної енергетичної обробки мазуту Карабашського, Нижнекамського й Шугуровського нафтопереробних заводів (НПЗ) РФ (табл. 7.4) [54].

Таким чином, багатofакторна імпульсна енергетична дія на мазут дозволяє зменшити в'язкість системи на 20...30 % і підвищити температуру спалаху на 5...10 %. Після обробки кавітацією в мазуті утворюється до 35 % дизельного палива (температура відгону 250...290 °С).

Установлено також, що температура початку перегонки за атмосферного тиску обробленої в РІА нафти на 10 °С нижче, аніж необробленої. При цьому 50 % обробленої нафти переганяється за температури 265 °С, тоді як необробленої – за температури 328 °С (табл. 7.5) [54].

Таблиця 7.4 – Параметри мазуту до й після оброблення в роторному імпульсному апараті

Виробник мазуту	Тривалість віскозиметрії, с (ВЗ-246 ГОСТ 9070-75, 60 °С)			Температура спалаху, °С			Густина, кг/м ³		
	до	після	Δ, %	до	після	Δ, %	до	після	Δ, %
Карабашський НПЗ	155	90	42	120	127	5	925	920	0,5
Шугуровський НПЗ	38	23	39	105	115	9	915	915	0
Нижнекамський НПЗ	165	120	25	145	135	-7	920	920	0

Таблиця 7.5 – Параметри необробленої та обробленої кавітацією нафти

Сира нафта	Температура початку конденсації пари, °С	Температура, °С, за якої досягнуто об'ємної частки конденсату, %				
		10	20	30	40	50
Необроблена	75	134	189	237	286	328
Оброблена	65	110	161	196	241	265
Різниця	10	24	28	41	45	63

Кількість енергії, що вводили в суміш оброблюваних нафтопродуктів (з урахуванням затрат енергії на їхню подачу в РІА відцентровим насосом), становила 200...350 кДж/моль залежно від молекулярної маси оброблюваних нафтопродуктів.

Питомі затрати енергії на оброблення нафтопродуктів співвідносяться з енергією дисоціації зв'язків у молекулах вуглеводнів. Це дозволяє зробити висновок щодо наявності умов для розривання молекул вуглеводневого палива внаслідок імпульсної багатофакторної дії, тобто кавітаційної обробки (як гідродинамічної, так і ультразвукової).

7.4 Кавітаційний процесор компанії «БіоСам»

Кавітаційний процесор компанії «БіоСам» (рис. 7.5) дозволяє зробити виробництво біодизельного палива енергозберігаючим, безвідходним, стовідсотково якісним і відносно дешевим [82].

Зазвичай, що отримати біодизель, у спеціальних колонах змішують рапсову олію з метиловим спиртом, додають каталізатор (як правило, луг) і нагрівають суміш до температури 60 °С. Унаслідок реакції переетерифікації утворюється метиловий ефір і побічні продукти, зокрема гліцерин.

Цю технологію використовують у всьому світі, хоча реакція є тривалою та енерговитратною, вимагаючи приблизно 100...120 кВт · год.

Щоб інтенсифікувати процес, хрестоматійну формулу порушують: додають удвічі більше метанолу, аніж необхідно. Цей надлишок призводить до сильного омилення продукту, тому його необхідно промивати водою, розбавленою метанолом, а потім підсушувати. Якщо не видалити з

продукту надлишок спирту, температура спалаху одержаного палива буде невисокою, що погіршує його якість.

Майже всі ці проблеми можна вирішити, застосувавши кавітаційний процесор, створений у Краматорську (рис. 7.5 і 7.6) [82].



Рис. 7.5 – Фрагмент енергетичного блока процесора «БіоСам»



Рис. 7.6 – Зразки біодизеля, одержані з різної сировини на кавітаційному процесорі «БіоСам»

Кавітаційні технології радянські учені почали розвивати ще в 1950-х, але ці дослідження були закритими. До магнітно-імпульсної моделі кавітаційного реактора вони прийшли не відразу: спочатку досліджували властивості вихрових реакторів, потім було розроблено прямечійний кавітатор без термічного нагріву. Остання модель увібрала в себе усе краще від мо-

делей-попередників (рис. 7.7). Мікроплазмові утворення утримуються тепер в одній точці магнітним полем, що не дозволяє їм руйнувати поверхню реактора. Це також збільшує швидкість та ефективність реакції вдвічі. Різко (у 14...20 разів порівняно з класичною технологією) зменшується енергоспоживання.

Новий кавітатор є герметичним, компактним та автоматизованим. Повна автоматизація дозволяє установці самостійно визначати необхідну кількість каталізатору. Це гарантує одержання якісного продукту з сировини будь-якої якості й температури.



Рис. 7.7 – Загальний вигляд кавітаційного процесора «БіоСам»

Вартість розробленого реактора – 25 тис. євро, усієї установки продуктивністю 500 л/год. біодизеля – 60 тис. євро.

Сьогодні кавітатори українського виробництва працюють у РФ, Парагваї, Норвегії, Єгипті [82].

7.5 Автоматизовані комплекси MIXER

Автоматизовані комплекси MIXER (рис. 7.8) застосовують для виробництва біодизельного палива (метилового ефіру); очищення й безреагентного знезараження поверхневих вод; оброблення й стерилізації продуктів харчування і сировини для їхнього виробництва; змішування й нагрівання реакційних середовищ; передкрекінгового оброблення нафти, одержання гомогенізованого палива; приготування водно-мазутних емульсій, мастильно-охолоджувальних рідин тощо.

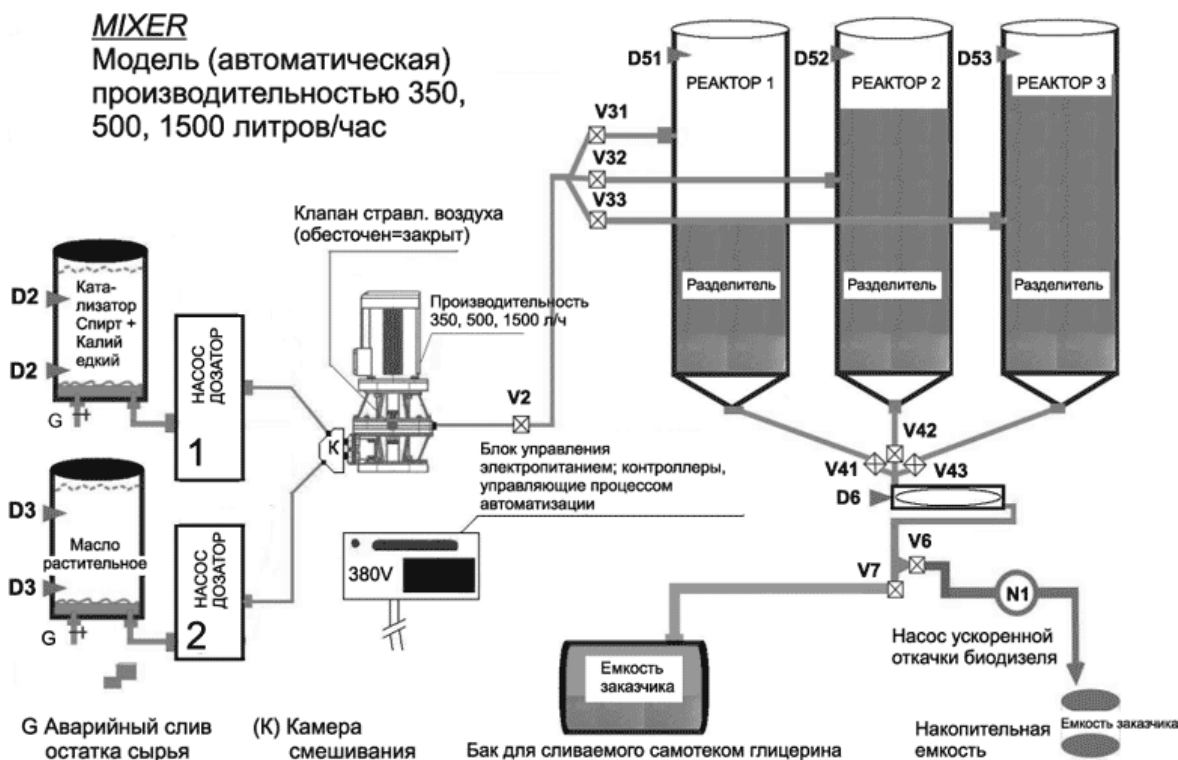


Рис. 7.8 – Принципова схема біодизельної установки MIXER [82]

Розроблені компанією «БіоСам» комплекси MIXER потужністю 7,5 і 15 кВт можуть виробляти до 500 і 1000 л/год якісного біопалива.

Унаслідок імпульсного кавітаційного оброблення в цих комплексах суміші олії, метанолу й катализатору відбувається розрив молекул жирних кислот. Це знижує в'язкість, збільшує цетанове число, поліпшує енергетичні характеристики майбутнього палива, а також значно збільшує швидкість і повноту реакції переетерифікації.

Використання гідродинамічного кавітаційного реактора для виробництва біодизельного палива дозволяє знизити температуру реакції переетерифікації до 30...35 °С, забезпечити її повноту й зменшити витрати енергії в 7...10 разів порівняно з існуючими технологіями та устаткуванням.

Комплекси MIXER повністю автоматизовано та оснащено високоточними дозувальними пристроями, що дозволяє змінювати кількість компонентів у режимі on-line відповідно до технологічних вимог.

Гнучка система керування не лише дозволяє налаштувати комплекс на існуючі технології, але й створити свою власну технологію.

7.6 Про дію біопалива на двигуни

У лабораторіях Поволзької МТС у грудні 2009 р. проведено науково-дослідні й натурні випробування, щоб оцінити ефективність роботи тракторів на різних видах біодизельного палива (табл. 7.6) [82].

Таблиця 7.6 – Основні показники, що характеризують властивості палив, використовуваних для дизельних двигунів [82]

Паливо	Коефіцієнт кінематичної в'язкості, мм ² /с	Густина, кг/м ³	Температура спалаху, °С	Температура застигання, °С
Дизельне	2,78	838...843	57	-15
Біопаливо	7,07	888...892	56	-18, не застигло
Сумішеве паливо (ДП/біопаливо)				
Б 10 (90/10)	3,04	846...850	80	-15
Б 20 (80/20)	3,30	848...853	81	-15
Б 30 (70/30)	3,68	852...857	82	-15
Б 40 (60/40)	4,09	858...862	82	-12
Б 50 (50/50)	4,48	863...868	83	-11

Стендові випробування виконували на гальмівній машині САК-Н Rapido згідно ГОСТ 18509 для двигуна Д-240 трактора МТЗ-82 із метою визначення його експлуатаційних показників.

Напрацювання тракторів після капітального ремонту становило 930 машино-год. Тому перед початком робіт паливно-економічні параметри двигуна доводили до вимог нормативної документації. На стенді було здійснено регулювання ТНВД моделі 4УТНМ на стенді. Результати перевірки насоса наведено в табл. 7.7.

Таблиця 7.7 – Результати перевірки насоса 4УТНМ (напрацювання – 3 год) [82]

Частота обертання, хв. ⁻¹	Тиск палива в головці, кгс/см ²	Кількість циклів	Подача палива, см ³				Годинна подача, кг/год	Циклова подача, мм ³	Нерівномірність, %
			1	2	3	4			
100	1,0	100	24,0	24,2	24,4	25,0	4,8	245	2,8
350	1,3	100	7,4	7,6	7,5	7,6	3,9	56,5	
600	1,4	100	8,8	8,9	8,8	9	10,6	89	
700	1,4	100	8,2	8,4	8,3	8,4	11,6	83	
850	1,2	100	8,2	8,3	8,2	8,3	13,9	82	
900	1,2	100	8,0	8,1	8,0	8,1	14,3	80	
1000	1,2	100	7,2	7,4	7,2	7,4	14,7	77	
1100	1,4	100	7,0	7,0	7,0	7,0	15,3	70	1,3
1125	початок дії регулювальника								
1160	повне автоматичне відключення подачі								

За результатами випробувань (табл. 7.8) зроблено такі висновки:

– експлуатаційні характеристики двигуна Д-240 при роботі на дизельному паливі відповідають нормативним вимогам на цей двигун;

– потужності роботи двигуна на чистому дизельному паливі й сумішах біодизеля з дизельним паливом є близькими й перебувають у межах допуску. Незначне зростання потужності за співвідношення біодизеля й дизельного палива 50/50 можна пояснити вищою кінематичною в'язкістю сумішевого палива, що зменшує витоки в плунжерних парах;

– питома витрата палива при роботі двигуна на паливних сумішах є вищою, аніж для чистого дизельного паливі, що пояснюється меншою теплотворною здатністю біопалива.

Таблиця 7.8 – Результати стендових гальмівних випробувань двигуна Д-240 [82]

Паливо	Потужність експлуатаційна, кВт	Питома витрата палива, г/кВт · год	Годинна витрата палива, кг/год
Дизельне паливо	55,3	238	13,2
Сумішеве паливо (ДП/біодизель)			
Б 10 (90/10)	56,7	239	13,5
Б 20 (80/20)	56,9	241	13,7
Б 30 (70/30)	56,8	242	13,5
Б 40 (60/40)	56,2	246	13,7
Б 50 (50/50)	56,6	249	14,1

Після випробувань на соплах форсунок присутній рихлий нагар. Перевірка роботи форсунок на стенді засвідчила їхню працездатність, а тиск початку впрыскування залишився тим самим. Розпил задовільний.

7.7 Висновки

Аналіз сучасних інформаційних джерел показує, що у світі накопичено великий досвід трансформації ріпакової олії в паливо. У свою чергу, сучасні технології зробили використання біопалива економічно вигідним та екологічно бажаним. В Україні є всі можливості організації виробництва моторних мастил і дизельного палива з ріпакової олії.

Аналіз практики використання ріпаку як поновлюваного енергоносія свідчить, що найдоцільнішим його використанням є глибока переробка цієї сировини, кінцевим продуктом якої є дизельне паливо – метиловий ефір. За такого підходу не потрібно доопрацьовувати дизельні двигуни, що вже працюють.

Позитивного ефекту, до того ж без переобладнання двигунів, можна також досягти, якщо налагодити виробництво паливної суміші з 70...80 % нафтового палива й 20...30 % ріпакової олії, що надалі піддається високоактивній гідродинамічній активації за встановлених ефективних режимів (зокрема, магніто-імпульсному).

Особливість цієї технології полягає в тому, що мікроплазмові утворення утримуються в одній точці магнітним полем, що не дозволяє їм руйнувати поверхню реактора. Це також збільшує швидкість та ефективність реакції вдвічі. Різко (у 14...20 разів порівняно з класичною технологією) зменшується енергоспоживання.

Результати випробувань дизельного двигуна при роботі на дизельному паливі та його сумішах із біодизельним паливом свідчать, що його експлуатаційні характеристики майже не відрізняються, хоча витрата сумішевого палива є більшою.

8 ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА З ВИКОРИСТАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ

У цьому розділі досліджено питання, пов'язані з ефективністю виробництва біодизельного палива з використанням низькочастотного ультразвуку, зокрема проаналізовано процес ультразвукової переетерифікації. Розглянуто економічні та екологічні переваги цього процесу, наведено методику розрахунку низькочастотного ультразвукового кавітаційного апарата з циліндричною проточною камерою.

8.1 Доцільність застосування ультразвуку

Відповідно до другого напрямку вдосконалення технологічних засад виготовлення біопалива, а саме вибору ефективних методів інтенсифікації процесу (зокрема, кавітаційних [118]), слід зазначити, що необхідного технологічного результату можна досягти, застосовуючи для оброблення сумішей вуглеводнів фізико-хімічних ефектів, зокрема таких, що спостерігаються під час гідродинамічної та ультразвукової кавітації (ударні та ультразвукові хвилі, автоколювання, вібротурбулізація, спрямована дифузія тощо) [65].

У виробництві біодизельного палива саме низька швидкість реакції і повільний масообмін зменшують обсяг та якість продукту. Вирішити цю проблему можна, застосовуючи ультразвукові реактори [32], які покращують динаміку переетерифікації, зоні дії (полі) ультразвукових хвиль відбуваються окислювально-відновні процеси міжмолекулярного перегрупування, синтезу й деструкції тощо [13, 32].

Ультразвукова дія кавітації, що забезпечує необхідну енергію активації для промислової переетерифікації, – ефективний метод досягнення кращої якості диспергування й гомогенізації рідких середовищ у промисловому виробництві біодизеля.

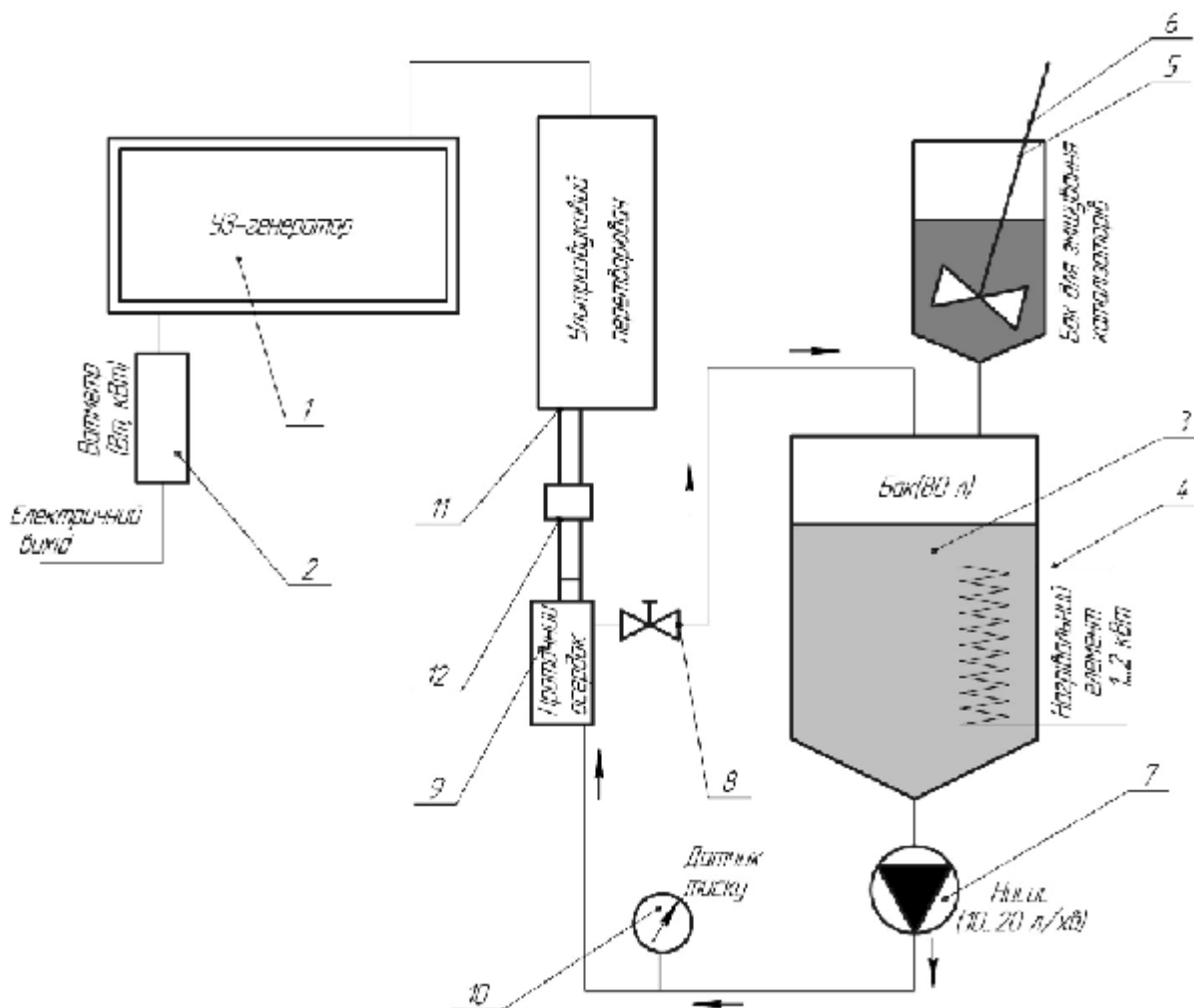
8.2 Періодичний процес виробництва

Біодизельне паливо з рапсової, соєвої, соняшникової олії й тваринних жирів одержують переетерифікацією жирних кислот в присутності метанолу (чи етанолу) і каталізатора (лугу), унаслідок чого утворюються метиловий чи етиловий ефіри цих кислот. Побічним продуктом реакції є гліцерінова фаза. Легші від гліцерину ефіри піднімаються вгору, і їх можна вилучити відстоюванням чи центрифугуванням.

Зазвичай, біодизель одержують у реакторах періодичної дії. Щоб підвищити ефективність виробництва, у деяких установках застосовують ультразвукове оброблення (рис. 8.1) [72-73].

Виробництво біодизеля тоді складається з таких етапів: підготовка компонентів; підігрів суміші; її оброблення об'ємним низькочастотним

ультразвуком за визначеного робочого тиску; відокремлення гліцеринової фази; промивання утвореного біодизеля водою.



- 1 – ультразвуковий генератор потужністю 0,5 чи 1,0 кВт (частота 16...22 кГц);
 2 – ватметр; 3 – бак (наприклад, із поліетилену низької густини – ПЕНГ);
 4 – нагрівальний елемент; 5 – 10-літровий бак для попереднього змішування каталізаторів (наприклад, із ПЕНГ); 6 – пристрій для змішування каталізаторів;
 7 – насос (із центрифугою); 8 – клапан зворотної тяги для регулювання тиску;
 9 – проточний елемент; 10 – датчик тиску; 11 – ультразвуковий перетворювач;
 12 – концентратор поздовжніх ультразвукових коливань.

Рис. 8.1 – Установа для виробництва 60...70 л/год біодизельного палива із застосуванням ультразвукової обробки

Розглянемо ці етапи докладніше.

Приблизно 0,2...0,4 кг гідроксиду калію змішують із 8,5 л метанолу в пристрої 6. У бак 3 заливають 66 л олії, яку нагрівають за допомогою елемента 4 до 45...67 °С. Після повного розчинення каталізатору в метанолі суміш спрямовують у бак 3. За допомогою насоса 7 і клапана зворотної тяги 8 підвищують тиск в баку 3 до 0,1...0,3 МПа.

Вмикають ультразвуковий генератор 1 і протягом 20 хв. здійснюють рециркуляцію суміші, під час якої олія перетворюється на біодизель. Після цього насос 7 та ультразвуковий генератор вимикають. Відокремлюють гліцеринову фазу на центрифугу або відстоюванням протягом 30...60 хв.

Оскільки після відокремлення гліцеринової фази біодизель містить домішки, його промивають водою. Для прискорення й підвищення якості цього процесу також можна застосувати ультразвук, дія якого зменшує розмір крапель, отже збільшує площу активної поверхні. При цьому слід враховувати, що велика потужність ультразвуку настільки подрібнює краплі води, що вони утворюють стійку емульсію. Зазвичай, тривалість та інтенсивність ультразвукової дії визначають дослідним шляхом.

8.3 Неперервний процес виробництва

На схемі виробничого процесу (див. рис. 8.2) показано стандартний процес ультразвукової дії при виробництві біодизеля.

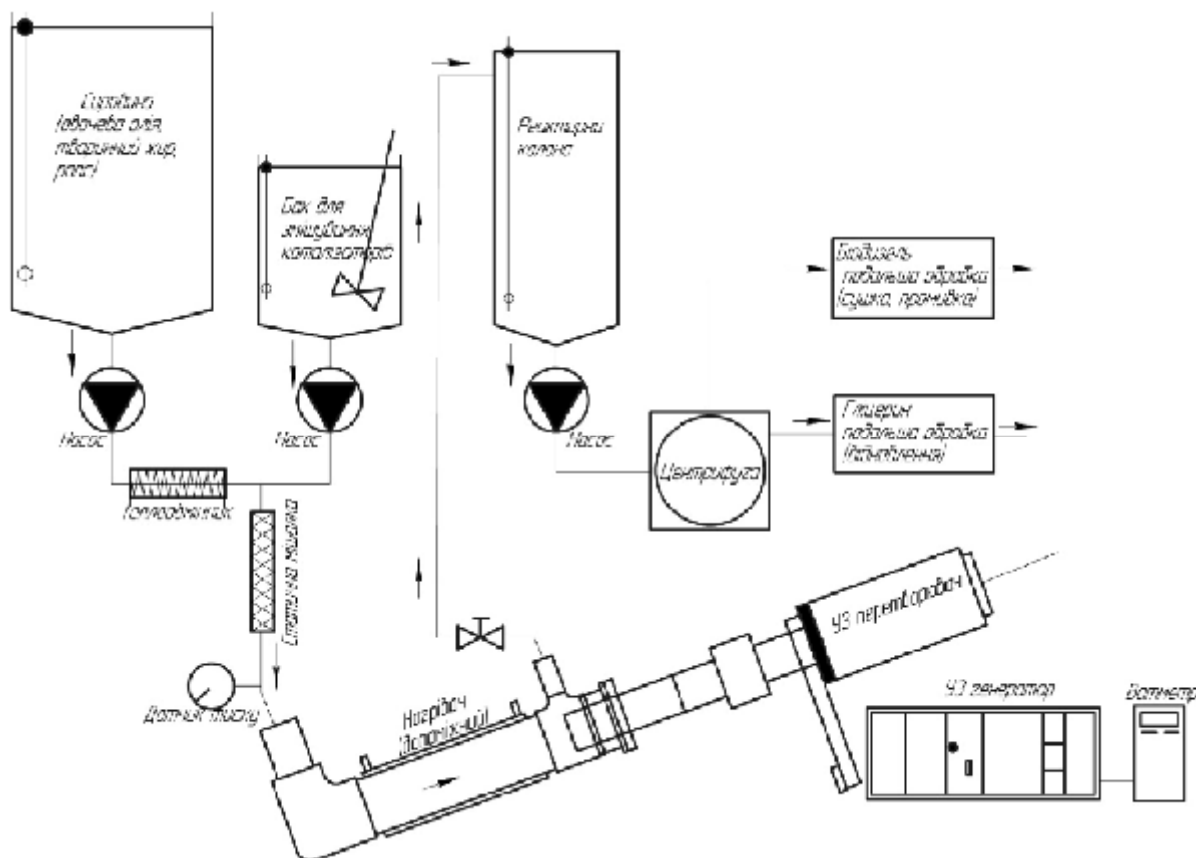


Рис. 8.2 – Принципова схема неперервного процесу виробництва біодизеля

У неперервному виробництві біодизеля (рис. 8.2) підігріту олію, метанол і каталізатор безперервно змішують регульованим насосом. Вбудований статичний пристрій для змішування каталізаторів дозволяє збільшити однорідність суміші, що спрямовують в ультразвуковий реактор.

На суміш діють ультразвуком протягом 5...30 с, після чого спрямовують в реакторну колону, місткість якої вибрано так, щоб суміш залишалася в ній приблизно годину. Протягом цього часу триває процес переетерифікації. Далі суміш надходить центрифугу, де гліцеринову фазу.

Процес виробництва містить також стадії відновлення метанолу, промивання та осушення біодизеля, що також можуть бути неперервними.

Наведена схема виключає необхідність установа декількох біодизельних реакторів, традиційних мішалок і сепараторів великої місткості.

8.4 Швидкість ультразвукової переетерифікації

На рис. 8.3 і 8.4 наведено результати переетерифікації рапсової олії метилатом натрію (а) і калію (б) із застосуванням ультразвуку. За контрольний показник взято рівень переетерифікації за інтенсивного перемішування. Уздовж горизонтальної осі відклали тривалість процесу, уздовж вертикальної – частку гліцеринової фази (за спрощеною схемою розрахунку швидкості реакції).

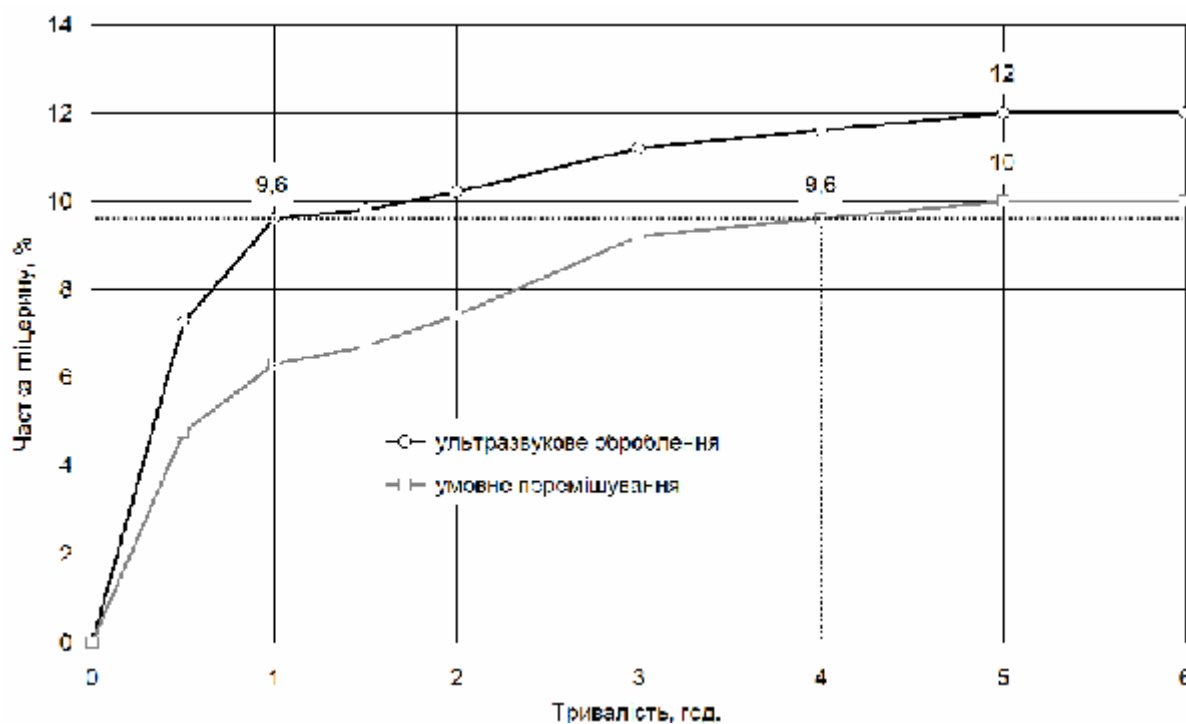


Рис. 8.3 – Результати переетерифікації рапсової олії (промислового сорту) із метилатом натрію

Тому доцільним є розроблення методики розрахунку низькочастотного ультразвукового кавітаційного апарата з циліндричною проточною камерою.

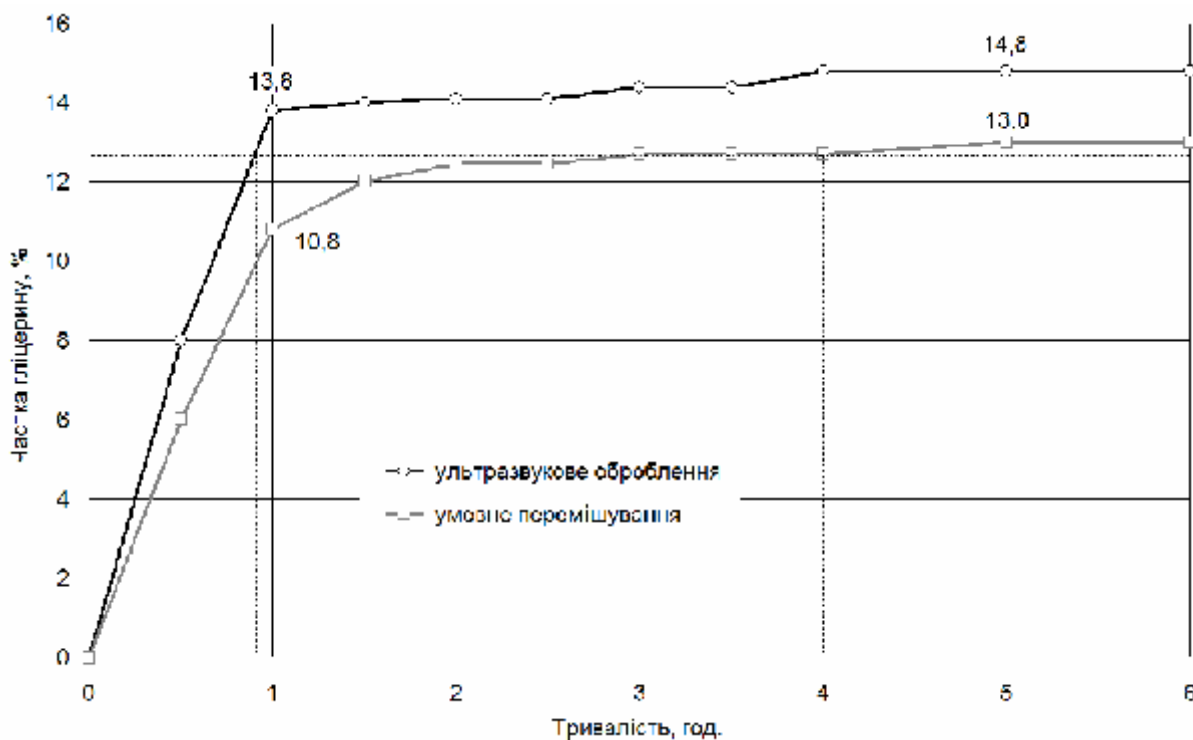


Рис. 8.4 – Результати переетерифікації рапсової олії (промислового сорту) із метилатом калію

8.5 Методика розрахунку низькочастотного ультразвукового кавітаційного апарата з циліндричною проточною камерою

Засоби кавітаційної обробки

Відома кавітаційна обробка рідини в потоці за допомогою гідромеханічних апаратів [14, 25, 102-105], істотним недоліком яких є необхідність створення швидкісного потоку рідини, що в багатьох випадках потребує встановлення розгінних насосів.

Окрім того, висока агресивність і компонентна, наприклад сольова, насиченість деяких рідин не дозволяє встановлювати механічні перешкоди в потоці, оскільки на них швидко нарастають відкладення, що призводить до зростання опору течії.

Для деяких рідин і технологічних процесів неприпустимим є швидкісне транспортування рідини й залучення для отримання необхідної швидкості механічних насосних агрегатів. У гідромеханічних кавітаційних апаратах не передбачається можливості тонкого регулювання інтенсивності кавітаційного процесу, що заважає досягти максимальної ефективності впливу на рідинні компоненти.

Тим часом, ультразвукове кавітаційне оброблення рідини дозволяє не втручатися в характеристики течії рідини і може бути задіяне за будь-якої її швидкості.

При цьому відсутня потреба у встановленні в потоці рідини механічних перешкод чи генераторів механічних коливань для збудження кавітації, тобто ультразвукові кавітаційні апарати (рис. 8.5) не тільки не додають гі-

дросистемі місцевих перешкод, а, навпаки, підвищують їхню пропускну здатність завдяки високочастотній вібрації стінок трубопроводу, що зменшує коефіцієнт в'язкого тертя рідини по стінках трубопроводу, зменшуючи втрати напору [106-109].

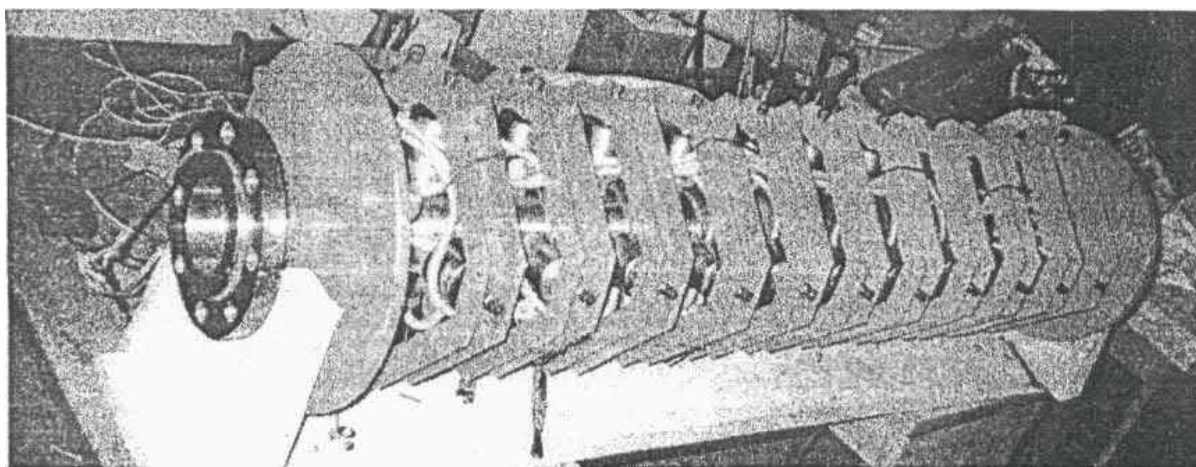


Рис. 8.5 – Ультразвуковий кавітаційний апарат для оброблення рідини в потоці

Акустичну енергію до труби 1 (рис. 8.6) [106, 107] підводять за допомогою ультразвукових випромінювачів 2, що щільно притискають до її зовнішньої поверхні. У такому разі не порушується герметичність труби і досягається легкість обслуговування й ремонту апарата.

Ультразвукові випромінювачі 2 притискають до труби 1 за допомогою гвинтів 3, установлених на хомутах 4. Гвинт 3 тисне на випромінювач через кульку 5 і стакан 6, завдяки чому відсутні перекоси і забезпечується щільний контакт труби з випромінювачем. Стакан 6 упирається у випромінювач у точці мінімальної амплітуди коливань стоячої хвилі деформації, що утворюється на його резонансній довжині.

Уздовж труби розташовано декілька секцій ультразвукових випромінювачів, що забезпечують потрібну потужність кавітатора. Труба має на торцях фланці, за допомогою яких апарат встановлюють у технологічну магістраль. Задіяні в кавітаційному апараті ультразвукові випромінювачі зібрані на базі півхвильової акустичної системи поздовжніх коливань.

Джерелом ультразвукових коливань є п'єзоелектричний перетворювач, зібраний із двох встановлених послідовно п'єзокілець 7, підключених паралельно до генератора електричних коливань. Необхідне значення резонансної частоти коливань досягають вибором акустичних розмірів і властивостей матеріалу демпфера 8 і трансформатора швидкості 9.

Знаючи резонансну частоту радіально-згинальних коливань труби й необхідну потужність кавітатора, можна вибрати потрібну кількість випромінювачів, які встановлюють на зовнішній поверхні труби.

На рис. 8.7 наведено варіанти схем радіально-згинальних пружних коливань перерізу труби у разі встановлення трьох і чотирьох ультразвукових випромінювачів.

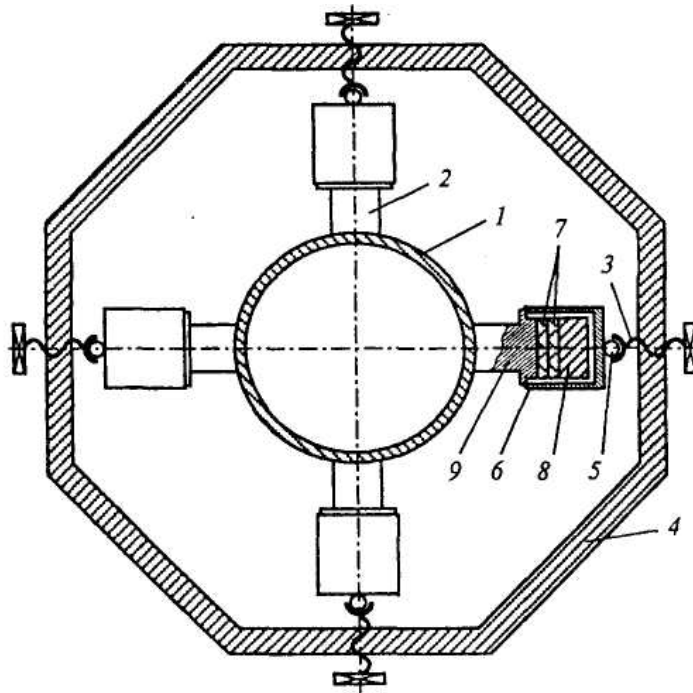


Рис. 8.6 – Схема ультразвукового кавітаційного апарата для оброблення рідини в потоці

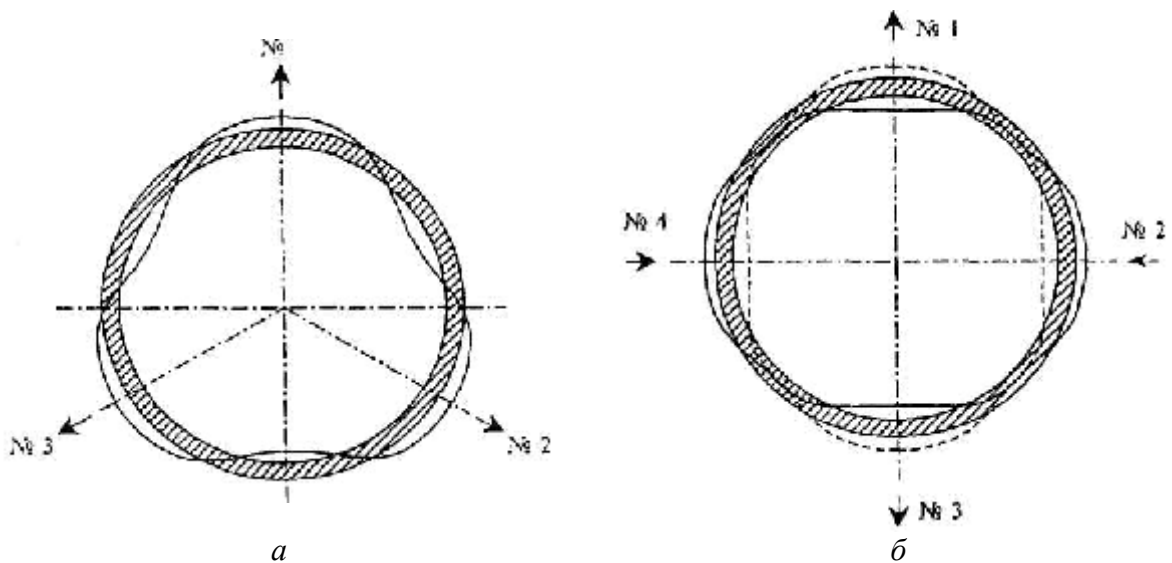


Рис. 8.7 – Схеми пружної деформації перерізу труби в разі підключення трьох (а) і чотирьох (б) ультразвукових випромінювачів

Наведені схеми дозволяють зробити висновок, що в разі застосування непарної кількості випромінювачів, наприклад трьох (рис. 8.7, а), вони мають працювати синфазно. У разі ж застосування парної кількості випромінювачів, коли їхня кількість більше двох (рис. 8.7, б), сусідні випромінювачі мають працювати протифазно.

Оскільки випромінювачі живлять від одного генератора, протифазного режиму роботи досягають, урахувавши полярність п'єзоелементів.

Оскільки ефективність роботи такого кавітаційного апарата визначають за рівнем кавітації, що досягається в рідині під час її руху в трубі, коливання стінок труби слід узгодити з поздовжніми коливаннями складених п'єзоелектричних перетворювачів [110].

Методика розрахунку

Пропонована методика розрахунку розглядає ультразвуковий кавітаційний апарат як резонансну механічну систему й передбачає розрахунок резонансних акустичних розмірів елементів, що її утворюють.

Ураховуючи значну складність коливальної системи, що розглядається, зроблено такі припущення:

- окремі секції п'єзоелектричних перетворювачів, установлені послідовно вздовж труби не впливають одна на одну;
- поздовжніми й згинальними коливаннями вздовж труби можна знехтувати;
- рідина не впливає на коливальну систему.

Останнє припущення є справедливим, оскільки в трубі наявна розвинена кавітація, що утворює двофазний потік рідини й відповідне падіння хвильового опору.

Аналіз задіяних схем деформації труби (див. рис. 8.7) свідчить, що внутрішній об'єм труби не змінюється, і пружні властивості рідини не впливають на параметри її коливань, тобто має місце нехтовно мале навантаження з боку рідини, і резонансна частота коливальної системи не залежить від реологічних властивостей рідини.

Частота f радіально-згинальних коливань кільця за умови, що розміри його поперечного перерізу є малими порівняно з радіусом r центральної лінії перерізу [111]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_4 I^2 i^2 (1-i^2)^2}{Fr^4 \rho_4 (1+i^2)}}, \quad (8.1)$$

де I – осьовий момент інерції поперечного перерізу кільця; ρ_4 – густина матеріалу кільця; i – кількість півхвиль уздовж кола кільця; F – площа поперечного перерізу кільця; E_4 – модуль пружності на розтягування матеріалу кільця.

Ураховуючи залежності

$$C_4 = \sqrt{\frac{E_4}{\rho_4}}; \quad I = \frac{H(r_1 - r_2)^2}{12}; \quad F = H(r_1 - r_2)$$

де r_1 і r_2 – радіуси внутрішньої і зовнішньої поверхні кільця; C_4 – швидкість звуку в матеріалі кільця; H – висота поперечного перерізу кільця:

$$f = \frac{1}{2r^2\pi} C_4 \frac{h}{\sqrt{12}} K, \quad \text{де } K = \sqrt{\frac{i^2 (1-i^2)^2}{(1+i^2)}},$$

тобто частота радіально-згинальних коливань кільця не залежить від висоти його поперечного перерізу.

Залежність (8.1) можна застосовувати й для розрахунків радіально-згинальних коливань труби як елемента резонансної системи, що розглядається. Значення коефіцієнта K для вірогідних випадків радіально-згинальних коливань наведено нижче.

i	4	5	6	7	8	9	10
K	14,553	23,534	34,522	47,518	62,516	79,514	98,507

Точність розрахунку за цією методикою i , відповідно, ефективність роботи кавітатора значною мірою залежать від якості контакту ультразвукових випромінювачів із поверхнею труби. Цей контакт повинен мати мінімальні акустичні втрати, тобто бути дуже щільним. Окрім того, площа контакту має бути малого розміру в поперечному перерізі порівняно з півхвилею згинальної деформації і бути витягнутою вздовж труби.

Акустичні розміри елементів складеного п'єзоелектричного перетворювача розраховують за схемою, наведеною на рис. 8.8.

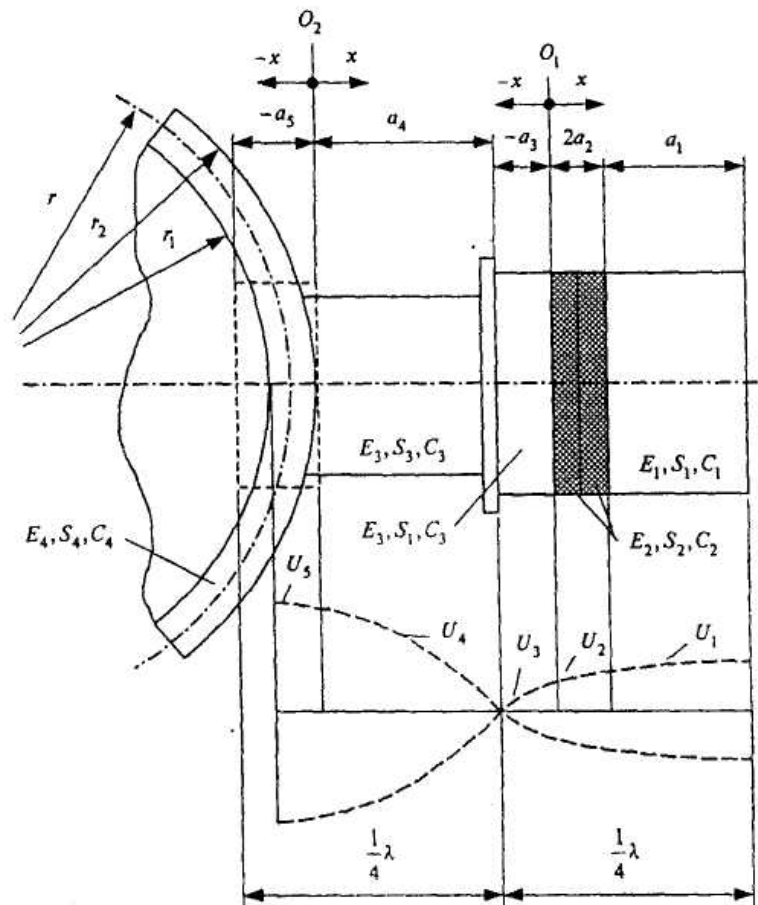


Рис. 8.8 – Розрахункова схема півхвильового п'єзоелектричного перетворювача

Оскільки кавітаційний апарат, що розглядається, працює в резонансному режимі, перехідними процесами в п'єзоелектричних перетворювачах

можна знехтувати і не враховувати властивості зворотного п'єзоефекту. Тоді рівняння поздовжніх коливань в загальному вигляді [112]:

$$S \frac{\partial^2 U}{dt^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (8.2)$$

де V – поздовжнє переміщення; C – швидкість звуку; S – площа поперечного перерізу.

Для перетворювача, що здійснює гармонічні коливання і має деяку власну частоту, розв'язок рівняння (8.2):

$$U(x, t) = U(x) (A \sin \omega t + B \cos \omega t).$$

Щоб спростити розрахунки, уведемо дві системи відліку – O_1 і O_2 (див. рис. 8.8). Тоді в системі відліку O_x для накладки, що знижує частоту, для прилеглих до неї п'єзокерамічних кілець і ступеня більшого діаметра ультразвукового трансформатора швидкості:

$$U_1(x, t) = \left(A_1 \cos \frac{\omega}{c_1} x + B_1 \sin \frac{\omega}{c_1} x \right) \sin(\omega t + \varphi), \quad (8.3)$$

$$U_2(x, t) = \left(A_2 \cos \frac{\omega}{c_2} x + B_2 \sin \frac{\omega}{c_2} x \right) \sin(\omega t + \varphi), \quad (8.4)$$

$$U_3(x, t) = \left(A_3 \cos \frac{\omega}{c_3} x + B_3 \sin \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi); \quad (8.5)$$

де c_1, c_2, c_3 – швидкості звуку відповідно в матеріалі накладки, що знижує частоту, п'єзокерамічному матеріалі й матеріалі ультразвукового трансформатора швидкості.

Межові умови подамо так:

$$U_2 = 0, \text{ коли } x = -a_3; \quad (8.6)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= U_3 \\ E_2 S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} &= E_3 S_1 \frac{\partial U_3}{\partial x} \end{aligned} \right\}, \text{ коли } x = 0; \quad (8.7)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= U_1 \\ E_2 S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} &= E_1 S_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} \end{aligned} \right\}, \text{ коли } x = 2a_2, \quad (8.8)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} = 0, \text{ коли } x = a_1 + 2a_2; \quad (8.9)$$

де E_1, E_2, E_3 – модулі пружності на розтягування відповідно для накладки, що знижує частоту, п'єзокерамічних кілець і ступеня більшого діаметра ультразвукового трансформатора швидкості; S_1, S_2 – площі поперечного перерізу накладки, яка знижує частоту і п'єзокерамічних кілець.

Ураховуючи умову (8.6), із рівняння (8.5):

$$A_3 \cos \frac{\omega}{c_3}(a_3) = B_3 \sin \frac{\omega}{c_3}(a_3), \text{ або } A_3 = B_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3}(a_3). \quad (8.10)$$

Тоді (8.5) можна переписати у вигляді

$$U_3(x, t) = B_3 \left[\sin \frac{\omega}{c_3} x + \cos \frac{\omega}{c_3} x \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3}(a_3) \right] \sin(\omega t + \varphi). \quad (8.11)$$

Ураховавши першу рівність межої умови (8.7), із (8.4) і (8.11):

$$A_2 = B_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3}(a_3), \quad (8.12)$$

а згідно з другою рівністю умови (8.7) після диференціювання (8.4) і (8.11):

$$E_2 S_2 \frac{B_2}{C_2} = E_3 S_1 \frac{B_3}{C_3}, \text{ або } \frac{E_3 S_1 C_2}{E_2 S_2 C_3} = \frac{B_2}{B_3}. \quad (8.13)$$

Спільно розв'язавши рівняння (8.12) і (8.13):

$$\frac{E_3 S_1 C_2}{E_2 S_2 C_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3} = \frac{B_2}{A_2}. \quad (8.14)$$

Межова умова (8.5) зводить рівняння (8.3) до

$$B_1 = A_1 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1}(a_1 + 2a_2). \quad (8.15)$$

З урахуванням виразу (8.15), рівняння (8.3):

$$U_1(x, t) = A_1 \left[\cos \frac{\omega}{c_1} x + \sin \frac{\omega}{c_1} x \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1}(a_1 + 2a_2) \right] \sin(\omega t + \varphi). \quad (8.16)$$

Згідно з першою рівністю умови (8.8) із рівнянь (8.4) і (8.16):

$$A_2 \left[\cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \frac{B_2}{A_2} \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right] = A_1 \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1}(a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right] \quad (8.17)$$

Після диференціювання (8.17) з урахуванням другої рівності умови (8.8):

$$\begin{aligned} A_2 \left[\frac{B_2}{A_2} \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right] = \\ = A_1 \frac{E_1 S_1 C_2}{E_2 S_2 C_1} \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1}(a_1 + 2a_2) - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right] \end{aligned} \quad (8.18)$$

Поділивши (8.17) на (8.18) і врахувавши (8.14), після перетворень:

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 S_1 c_2 \left(Z \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)}{E_2 S_2 c_3 \left(Z \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)} \quad (8.19)$$

$$\text{де } Z = \frac{E_2 S_2 C_1 \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}{E_1 S_1 C_2 \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}$$

Якщо задати товщину a_1 накладки, яка знижує частоту перетворювача, і товщину a_2 п'єзокерамічного кільця, яке заплановано використати в конструкції, то за допомогою (8.19) можна отримати величину переміщення п'єзокерамічних кілець відносно вузлової точки з мінімальною амплітудою коливань і максимально навантаженим режимом роботи.

Переходячи за схемою (див. рис. 8.8) до системи відліку O_2 , матимемо можливість розрахувати акустичні розміри ступеня меншого діаметра ультразвукового трансформатора швидкості.

У цьому випадку розв'язок загального рівняння (8.2) поздовжніх коливань:

$$U_4(x, t) = \left(A_4 \cos \frac{\omega}{c_3} x + B_4 \sin \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi), \quad (8.20)$$

$$U_5(x, t) = \left(A_5 \cos \frac{\omega}{c_4} x + B_5 \sin \frac{\omega}{c_4} x \right) \sin(\omega t + \varphi); \quad (8.21)$$

де c_4 – швидкість звуку в матеріалі труби кавітатора.

Межові умови коливальної системи з точкою відліку O_2 :

$$U_4 = 0, \text{ коли } x = a_3; \quad (8.22)$$

$$\left. \begin{aligned} U_4 &= U_5 \\ E_3 S_3 \frac{\partial U_4}{\partial x} &= E_4 S_4 \frac{\partial U_5}{\partial x} \end{aligned} \right\}, \text{ коли } x = 0; \quad (8.23)$$

$$\frac{\partial U_5}{\partial x} = 0, \text{ коли } x = -a_5; \quad (8.24)$$

де S_4 – площа поперечного перерізу циліндра, еквівалентного за масою частині труби, що коливається з трансформатором швидкості як одне ціле; a_5 – висота еквівалентного циліндра.

Із (8.20) за умови (8.22):

$$A_4 \cos \frac{\omega}{c_3}(a_4) = -B_4 \sin \frac{\omega}{c_3}(a_4), \text{ або } B_4 = -\frac{A_4}{\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3}(a_4)}. \quad (8.25)$$

З урахуванням першої рівності умови (8.23), із рівнянь (8.20) і (8.21):

$$A_4 = A_5. \quad (8.26)$$

Другу рівність умови (8.23) можна перетворити так:

$$E_3 S_3 C_4 B_5 = E_4 S_4 C_3 B_4. \quad (8.27)$$

З умови (8.24) і рівняння (8.21):

$$-A_5 \sin \frac{\omega}{c_4}(-a_5) + B_5 \cos \frac{\omega}{c_4}(-a_5) = 0, \text{ звідки } -A_5 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_4}(a_5) = B_5.$$

З урахуванням (8.27) і (8.16):

$$\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_4 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_4} a_5 = \frac{E_3 S_3 c_4}{E_4 S_4 c_3}, \text{ звідки } a_4 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 S_3 c_4}{E_4 S_4 c_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_4} a_5}.$$

Для спрощення цього виразу в конструкції, що розглядається, можна покласти $S_4 = S_3$. Це припущення є справедливим, оскільки в цьому випадку використовується мале значення коефіцієнта трансформації в трансформаторі швидкості, спричинене великим рівнем навантаження випромінювача, що притискається до труби із значним зусиллям. Окрім того, мале значення коефіцієнта трансформації та, зазвичай, значна товщина стінки труби не дозволяють отримувати великі амплітуди радіально-згинальних коливань. Тоді, остаточно

$$a_4 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 c_4}{E_4 c_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_4}(r_2 - r_1)}.$$

Порівняльний аналіз розрахункових параметрів, одержаних за пропонованою методикою [113-117, 119], і параметрів виготовлених і впроваджених у промисловість кавітаційних апаратів із проточною камерою, стінки якої здійснюють радіально-згинальні коливання, свідчать, що похибка розрахунків не перевищує 10 %.

8.6 Економічні та екологічні переваги ультразвукового виробництва біодизеля

Застосування ультразвуку є ефективним способом прискорення хімічної реакції в процесі виробництва біодизеля, дозволяє зменшити енергетичні витрати і зробити виробництво більш екологічним.

Якщо процес виробництва біодизеля розглядати з комерційної точки зору, то вартість застосування ультразвуку в кінцевому продукті не перевищує \$0,01/л.

На рис. 8.9 наведено схему енергоефективності застосування ультразвукового устаткування у виробництві біодизеля [101].

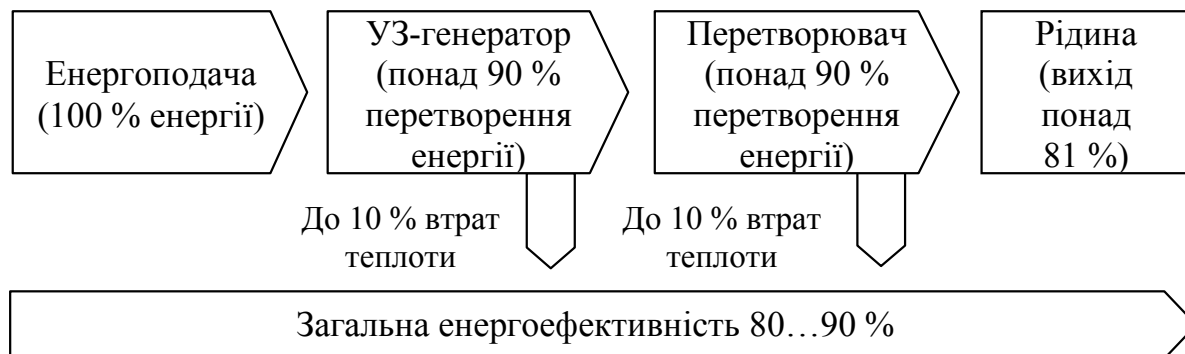


Рис. 8.9 – Схема енергоефективності використання ультразвукового устаткування у виробництві біодизеля

8.7 Висновки

Застосування низькочастотної ультразвукової кавітації у виробництві біодизеля покращує ступінь диспергування й гомогенізації суміші, скорочує тривалість циклу, зменшує кількість метанолу й каталізатора, а також підвищує якість гліцеринової фази. Ультразвукове устаткування допомагає знизити енергетичні витрати і зробити виробництво більш екологічним.

Удосконалена методика розрахунку ультразвукових кавітаторів надає можливість створити модельний ряд апаратів для трубопроводів різного діаметра й різних технологічних умов. Розроблені конструкції дозволяють, змінюючи кількість секцій випромінювачів, добирати потужність апаратів у широких межах.

Експлуатація експериментальних зразків розроблених кавітаторів за свідчила їхню високу ефективність, надійність і простоту обслуговування.

ВИСНОВКИ

Аналіз технічних, економічних та екологічних аспектів приготування багатокомпонентного біопалива дозволяє зробити такі висновки.

Біопаливо має цілу низку переваг порівняно з традиційними видами палива, як екологічних, так і експлуатаційних. Але ці переваги не мають бути нівельовані можливими негативними екологічними наслідками, пов'язаними з неправильним землекористуванням чи застосуванням застарілих технологій.

При цьому біопаливо не є панацеєю від енергетичних хвороб України. Його впровадження вимагає розв'язання цілого ряду проблем, а саме:

- біопаливо, зазвичай, виробляють із рослинної сировини, кількість якої обмежена потребами харчової промисловості;

- використання недостатньо енергоефективних технологій поки що не дозволяє зменшити вищу порівняно з традиційним паливом собівартість виробництва біопалива;

- через наявність кисню біологічне паливо має меншу енергоємність, ніж його вуглеводневі аналоги, що позначається на ефективності його використання та експлуатаційних характеристиках;

- застосування біопалива не дає гарантії скорочення викидів токсичних газів;

- будь-яке біологічне паливо користується обмеженою підтримкою з боку споживачів (оскільки його експлуатаційні та економічні характеристики вимагають поліпшення), автовиробників (яких, передусім, турбує його корозійна активність), нафтовиків і переробників (розглядають його як конкурента).

Не слід забувати й про те, що біопаливо – такий же вичерпний ресурс, як і нафта, оскільки під час його одержання «витрачається» (часто – необоротно) родючість земель сільськогосподарського призначення. Тому вирощувана в нашій країні сировина для виробництва біопалива має спрямовуватися насамперед на задоволення потреб українських споживачів, і завдання держави – цьому всіляко сприяти.

Для сталого розвитку біопаливної галузі Україні потрібен послідовний і системний план дій, розрахований щонайменше на десять років. На думку авторів, було б доцільно зробити такі комплексні кроки у таких напрямках: фінансова й регуляторна підтримка, регіональний розвиток і розвиток інфраструктури, екологічна раціональність, інформування та освіта.

Аналіз сучасних патентно-інформаційних і літературних джерел свідчить, що сьогодні відсутнє обґрунтування вибору та комбінування найбільш ефективних методів приготування біопалива для досягнення енергетичного ресурсозбереження та збільшення виходу продукту.

Виходячи з цього, убачається перспективним застосування як гідродинамічної, так і ультразвукової кавітації, або їхнього поєднання в одному технологічному процесі приготування біопалива.

Для одержання олії з різних культур в Україні розроблено ряд ефективних технічних засобів, зокрема, гвинтових малотоннажних, великотоннажних та інтегрованих олійних пресів. Для них характерними є великий вихід олії, висока якість, просте керування, неперервність роботи.

Важливим етапом виробництва олії є її очищення від фосфатидів, механічних та інших небажаних домішок.

Комплексне очищення олії з її одночасним освітленням можна реалізувати за допомогою фільтрів і відцентрових апаратів, не застосовуючи адсорбентів та інших реагентів, небезпечних для споживача.

В Україні існують компактні й легкі в керуванні установки блочно-модульного типу, що забезпечують ефективне комплексне очищення олійної сировини з одержанням екологічно чистих продуктів в умовах міні-цехів і фермерських господарств.

Аналіз практики використання ріпаку як поновлюваного енергоносія свідчить, що найдоцільнішим його використанням є глибока переробка цієї сировини, кінцевим продуктом якої є дизельне паливо – метиловий ефір. За такого підходу не потрібно доопрацьовувати дизельні двигуни, що вже працюють.

Позитивного ефекту, до того ж без переобладнання двигунів, можна також досягти, якщо налагодити виробництво паливної суміші з 70...80 % нафтового палива й 20...30 % ріпакової олії, що надалі піддається високоактивній гідродинамічній активації за встановлених ефективних режимів (зокрема, магніто-імпульсному).

Особливість цієї технології полягає в тому, що мікроплазмові утворення утримуються в одній точці магнітним полем, що не дозволяє їм руйнувати поверхню реактора. Це також збільшує швидкість та ефективність реакції вдвічі. Різко (у 14...20 разів порівняно з класичною технологією) зменшується енергоспоживання.

Результати випробувань дизельного двигуна при роботі на дизельному паливі та його сумішах із біодизельним паливом свідчать, що його експлуатаційні характеристики майже не відрізняються, хоча витрата сумішевого палива є більшою.

Застосування низькочастотної ультразвукової кавітації у виробництві біодизеля покращує ступінь диспергування й гомогенізації суміші, скорочує тривалість циклу, зменшує кількість метанолу й каталізатора, а також підвищує якість гліцеринової фази. Ультразвукове устаткування допомагає знизити енергетичні витрати і зробити виробництво більш екологічним.

Удосконалена методика розрахунку ультразвукових кавітаторів надає можливість створити модельний ряд апаратів для трубопроводів різного діаметра й різних технологічних умов. Розроблені конструкції дозволяють, змінюючи кількість секцій випромінювачів, добирати потужність апаратів у широких межах.

Експлуатація експериментальних зразків розроблених кавітаторів засвідчила їхню високу ефективність, надійність і простоту обслуговування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Рябцев Г. Л. Биэтанол от «А» до «Я» / Геннадий Рябцев // Терминал. – 2008. – № 13. – С. 6-15.
2. Рябцев Г. Л. Аналіз можливості використання первапарації під час одержання біоетанолу / Г. Л. Рябцев, В. В. Лобач, О. О. Гладкова, О. О. Козіцька // Вісник НТУУ «КПІ», сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2009. – № 1. – С. 47-50.
3. Рябцев Г. Л. Биодизель от «А» до «Я» / Геннадий Рябцев // Терминал. – 2007. – № 48. – С.8-15.
4. Рябцев Г. Л. Водоросли возвращаются / Геннадий Рябцев // Терминал. – 2008. – № 38. – С.6-11.
5. Аблаев А. Р. Производство и применение биодизеля : справ. пособие / А. Р. Аблаев, Ф. М. Гумеров, И. Ф. Левин и др. – М. : АПК и ППРО, 2006. – 80 с.
6. Перник А. Д. Проблемы кавитации / А. Д. Перник. – Л. : Судостроение. 1966. – 439 с.
7. Кнэпп Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М. : Мир, 1974. – 668 с.
8. Иванов А. П. Гидродинамика развитых кавитационных течений / А. П. Иванов. – Л. : Судостроение, 1980. – 240 с.
9. Федоткин И. М. Интенсификация технологических процессов / И. М. Федоткин. – К. : Вища шк. – 1979. – 344 с.
10. Федоткин И. М. Использование кавитации в технологических процессах / И. М. Федоткин, А. Ф. Немчин. – К. : Вища шк., 1984. – 68 с.
11. Федоткин И. М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности : в 2 ч. / И. М. Федоткин, И. С. Гулый. – К. : Полиграфкнига, 1997. – Ч. 1. – 839 с.
12. Федоткин И. М. Кавитационные энергетические аппараты и установки / И. М. Федоткин. – К. : Артур-А, 1998. – 134 с.
13. Федоткин И. М. Интенсификация процессов смешения и диспергирования гидродинамической кавитацией / И. М. Федоткин. – К. : Артур-А, 1998. – 127 с.
14. Федоткин И. М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности : в 2 ч. / И. М. Федоткин, И. С. Гулый. – К. : ОКО, 2000. – Ч. 2. – 898 с.
15. Федоткин И. М. Кавитационные техника и технологии / И. М. Федоткин, А. Н. Ткаченко. – К. : Техніка, 2001. – 462 с.
16. Агранат Б. А. Ультразвуковая технология / Б. А. Агранат. – М. : Metallurgia, 1974. – 216 с.
17. Мокрый Е. Н. Ультразвук в процессах окисления органических соединений / Е. Н. Мокрый, В. А. Старчевский. – Львов : Вища шк., 1987. – 120 с.
18. Яхова Н. А. Застосування кавітації в хімічній технології : у 2 ч. / Н. А. Яхова, О. М. Тимонін, В. І. Сівецький, О. Є. Колосов. – К. : НТУУ «КПІ», 2008. – Ч. 1. – 125 с.
19. Сухенко Ю. Г. Аспекти розроблення високоефективних методів і обладнання для обробки високодисперсних рідинних дво- і багатокomпонентних в'язких систем для приготування біопалива / Ю. Г. Сухенко, І. М. Федоткін, В. І. Сівецький, О. Є. Колосов // Тез. докл. 28-й конф. с междунар. участием и блиц-выставки «Композиционные материалы в промышленности» (Славполиком-2008). – Ялта, 2008. — С. 265-266.
20. Булгаков Б. Б. Застосування кавітації в хімічній технології : у 2 ч. / Б. Б. Булгаков, В. І. Сівецький, Н. А. Яхова, О. Є. Колосов. – К. : НТУУ «КПІ», 2009. – Ч. 2. – 100 с.
21. Ультразвук : маленькая энциклопедия / под ред. И. П. Голяминой. – М. : Сов. энциклопедия, 1979. – 192 с.

22. Кардашев Г. А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г. А. Кардашев. – М. : Химия, 1990. – 208 с.
23. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях / А. А. Долинский [и др.]. – К. : ИТТФ НАНУ, 1996. – 206 с.
24. Промтов М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества / М. А. Промтов. – М. : Машиностроение, 2004. – 136 с.
25. Новицкий Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Б. Г. Новицкий. – М. : Химия, 1983. – 192 с.
26. Тепло- и массообмен в звуковом поле / Накоряков В. Е. [и др.]. – Новосибирск : Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1970. – 254 с.
27. Основы физики и техники ультразвука / Б. А. Агранат [и др.]. – М. : Высш. шк., 1987. – 352 с.
28. Немчин А. Ф. Новые технологические эффекты тепломассопереноса при использовании кавитации / А. Ф. Немчин // Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 19. – № 6. – С. 39–47.
29. Богданов В. В. Эффективные малообъемные смесители / В. В. Богданов, Б. И. Христофоров, Б. А. Клоцунг. – Л. : Химия, 1989. – 224 с.
30. Young F. R. Cavitation / F. R. Young. – London : Imperial College Press, 1999. – 418 p.
31. Leighton T. G. The Acoustic bubble / T. G. Leighton. – London : Academic Press, 1994. – 240 p.
32. Маргулис М. А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях) / М. А. Маргулис. – М. : Высш. шк., 1984. – 272 с.
33. Suslick K. S. The chemical effects of ultrasound / K. S. Suslick // Scientific American. – 1989. – February. – P. 80-86.
34. Витенько Т. Н. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т. Н. Витенько, Я. М. Гумницкий // Химия и технология воды. – 2007. – Т. 29. – № 5. – С. 422-432.
35. Промтов М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М. А. Промтов. – М. : Машиностроение, 2001. – 260 с.
36. Балабышко А. М. Гидромеханическое диспергирование / А. М. Балабышко, А. И. Зимин, В. П. Ружицкий. – М. : Наука, 1998. – 330 с.
37. Балабышко А. М. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности / А. М. Балабышко, В. Ф. Юдаев. – М. : Недра, 1992. – 176 с.
38. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В. Н. Хмелев [и др.]. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 2007. – 400 с.
39. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. – Л. : Машиностроение, 1986. – 253 с.
40. Наугольных К. А. Электрические разряды в воде (гидродинамическое описание) / К. А. Наугольных, Н. А. Рой. – М. : Наука, 1971. – 190 с.
41. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / под ред. Г. А. Гулого. – М.: Машиностроение, 1977. – 320 с.
42. Кудимов Ю. Н. Электроразрядные процессы в жидкости и кинетика экстрагирования биологически активных компонентов. Часть 1. Ударные волны и кавитация / Ю. Н. Кудимов, В. Т. Казуб, Е. В. Голов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8. – № 2. – С. 253-264.
43. Балабудкин М. А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М. А. Балабудкин. – М. : Медицина, 1983. – 160 с.
44. Витенько Т. Н. Массообмен при растворении твердых тел с использованием гидродинамических кавитационных устройств / Т. Н. Витенько, Я. М. Гумницкий // Теор. основы хим. технологии. – 2006. – Т. 40. – № 6. – С. 639-644.

45. Долинский А. А. Теплофизические процессы в эмульсиях (получение, использование, утилизация) / А. А. Долинский, А. М. Павленко, Б. И. Басок. – К. : Наук. думка, 2005. – 264 с.
46. Влияние гидроакустического воздействия на свойства растворов и гидрогелей природных полисахаридов / Н. В. Лосев [и др.] // Изв. вузов ; Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, вып. 3. – С. 44-48.
47. Использование гидроакустического воздействия для диспергирования крахмальных гидрогелей / Н. В. Лосев [и др.] // Изв. вузов ; Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, вып. 9. – С. 68-73.
48. Технологическое сжигание и использование топлива / А. А. Винтовкин [и др.]. – М. : Теплотехник, 2005. – 288 с.
49. Волков А. Н. Сжигание газов и жидкого топлива в котлах малой мощности / А. Н. Волков. – Л. : Недра, 1989. – 160 с.
50. Зубрилов С. П. Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах / С. П. Зубрилов, В. М. Селиверстов, М. И. Браславский. – Л. : Судостроение, 1988. – 80 с.
51. Ивченко В. М. Кавитационная технология / В. М. Ивченко, В. А. Кулагин, А. Ф. Немчин ; под ред. Г. В. Логвиновича. – Красноярск : Изд-во КГУ, 1990. – 200 с.
52. Кулагин В. А. Суперкавитация в энергетике и гидротехнике / В. А. Кулагин. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2000. – 107 с.
53. Кормилицын В. И. Подготовка мазута к сжиганию для улучшения технико-экономических и экологических характеристик котельных установок / В. И. Кормилицын, М. Г. Лысков, А. А. Румынский // Новости теплоснабжения. – 2000. – № 4. – С. 19-21.
54. Промтов М. А. Кавитационная технология улучшения качества углеводородных топлив / М. А. Промтов // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 2. – С. 6-8.
55. Промтов М. А. Импульсные технологии переработки нефти и нефтепродуктов / М. А. Промтов, А. С. Авсеев // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2007. – № 6. – С. 22-24.
56. Золотухин В. А. Новая технология для переработки тяжелой нефти и осадков нефтеперерабатывающих производств / В. А. Золотухин // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 10. – С. 8-11.
57. Пат. 2078116 Российская Федерация, МПК С10G15/00. Способ крекинга нефти и нефтепродуктов и установка для его осуществления / А. Ф. Кладов. – № 95109844/04 ; заявл. 20.04.95 ; опубл. 27.04.97, бюл. № 8.
58. Пат. 2149886 Российская Федерация, МПК С10G32/00. Способ обработки нефти, нефтепродуктов, углеводородов / Быков И.Н. [и др.]. – № 99110547/04 ; заявл. 20.05.99; опубл. 27.05.2000, бюл. № 15.
59. Влияние кавитационного воздействия на углеводородное топливо / А. Ф. Немчин [и др.] // Пром. теплотехника. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 60–63.
60. Нестеренко А. И. Возможность крекинга углеводородов под действием кавитации. Количественная энергетическая оценка / А. И. Нестеренко, Ю. С. Берлиозов // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – № 6. – С. 43–44.
61. Производство и применение биодизеля : справ. пособие / А. Р. Аблаев [и др.]. – М. : АПК и ППРО, 2006. – 80 с.
62. Исследование вихревых и кавитационных потоков в гидравлических системах / Е. П. Запорожец [и др.] / Теор. основы хим. технологии. – 2004. – Т. 38. – № 3. – С.243–252.
63. Промтов М. А. Механизмы генерирования тепла в роторном импульсном аппарате / М. А. Промтов, В. В. Акулин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12. – № 2А. – С. 364-369.

64. Промтов М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14. – № 4. – С. 861-868.
65. Рябцев Г.Л. Аналіз сучасних засобів виробництва біодизельного палива / Г. Л. Рябцев, О. Є. Колосов, Д. Е.Сідоров, О.О. Гладкова // Вісник НТУУ «КПІ», сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2009. – № 2. – С. 48-54.
66. Колосов О.Є. Аналіз сучасних технічних засобів виробництва біодизельного палива / О. Є. Колосов, Б. Є. Степаненко, О. П. Колосова та ін. // Композиционные материалы в промышленности: XXX ежегодн. научн.-практич. конф. с междунар. участием и блиц-выставка: тез. докл. – Ялта, 2010 г. – С. 244-245.
67. Рябцев Г. Л. Биоэтанол от «А» до «Я» / Геннадий Рябцев // Терминал. – 2008. – № 13. – С. 6-15.
68. Пат. 86133 Україна, МПК (2006) C10L1/02, C10L1/18. Спосіб одержання альтернативного зимового біопалива для дизельного двигуна / Й. Ф. Рівіс, С. Й. Ковалишин, В. В. Том'юк (UA). – № a200708087 ; заявл. 16.07.07 ; опубл. 25.03.09, бюл. № 6.
69. Пат. 23758 Україна, МПК C11B1/00. Спосіб отримання метилових ефірів жирних кислот ріпакової олії / Ю. Г. Сухенко, О. А. Литвиненко, І. Л. Рудик, В. Б. Будзінський (UA). – № u200613654 ; заявл. 25.12.06 ; опубл. 11.06.07, бюл. № 8.
70. Пирсол И. Кавитация / И. Пирсол. – М. : Мир, 1975. – 280 с.
71. Федоткин И. М. Использование кавитации в промышленности / И. М. Федоткин, И. С. Гулый, Н. И. Шаповалюк. – К. : Арктур-А, 1997. – 133 с.
72. Пат. 85297 Україна, МПК C10L1/02, C07C67/03, C11C3/00, C10L1/18, C11B3/00. Лінія для виробництва біодизельного палива / В. О. Єжелев, О. М. Окунева, Ю. В. Єжелев (UA). – № a200704789 ; заявл. 28.04.07; опубл. 12.01.09, бюл. № 1.
73. Пат. 36284 Україна, МПК (2006) C10L1/00, 24H4/00. Модульна біодизельна установка / М. М. Барановський, М. І. Трегуб, В. В. Чуба (UA). – № u200804331 ; заявл. 07.04.08 ; опубл. 27.10.08, бюл. № 20.
74. Пат. 27524 Україна, МПК B01F00, C02F1/78. Установка для стабілізації суміші вуглеводнів / О. А. Литвиненко, Ю. Г. Сухенко, В. П. Сидоренко (UA). – № u200704479 ; заявл. 23.04.07 ; опубл. 12.11.07, бюл. № 18.
75. Булгаков Б. Б. Технологии фирмы «Интрек» : [рекламн.-информац. просп.] / Б. Б. Булгаков. – К. : НТУУ «КПІ», 2008. – 39 с.
76. Пат. 42966 Україна, МПК (2009) C10L1/18. Установка для виготовлення біодизельного пального / Ю. О. Дмитрієв, Ю. В. Косенко, І. В. Коц, В. М. Шишко (UA). – № u200902369 ; заявл. 17.03.09 ; опубл. 27.07.09, бюл. № 14.
77. Вейзон Б. Перспективи і задачі постачань олії на біодизельний ринок ЄС-Україна / Біл Вейзон // Олійно-жировий комплекс. – 2004. – №4 (7). – С. 70-71.
78. Пат. 31463 Україна, МПК(2006) C 10 L 8/00. Гідродинамічна установка для отримання біодизельного палива / Г. Є. Топілін, С. М. Умінський (UA). – № u200713588 ; заявл. 05.12.07 ; опубл. 10.04.08, бюл. № 7.
79. Topilin G., Yminski S., Yakovenko Y. Biodiesel fuel for agricultural machinery. Polish Academy Of Science Departament in Lublin. Commission Of Motorization and Power Industry in Agriculture. – TeKa. Lublin, 2008. – Vol. 8-7. – P. 283-287.
80. www.afuelsystems.com.
81. www.zerno-ua.com.
82. www.biosam.ru.
83. Фильтр-пресс ФП2-3000 (ТУ 34-38-10612-83).
84. www.agrovodcom.ru (передвижная электронасосная установка Ж6-ВНП-10/32).
85. Пат. 36314 Україна, МПК(2006) C 11 B 3/00. Установка для двохступеневої очистки рослинної олії / Г. Є. Топілін, І. А. Кедь (UA). – № u200804888; заявл. 15.04.08 ; опубл. 27.10.08, бюл. № 20.
86. www.amina.biz (фільтр-преси з вертикальним розташуванням перегородок).

87. Пат. 2055867 РФ, МПК С 11 В 3/04. Способ очистки рафинированных хлорофилл-содержащих растительных масел от пигментов, остатков щелочных мыл и фосфолипидов / Н. В. Комаров, А. И. Аскинази, Н. В. Лобаев и др. (RU). – № 94024673/13 ; заявл. 11.07.94 ; опубл. 10.03.96, бюл. № 6.
88. Белобородов В. В. Основные процессы производства растительных масел / В. В. Белобородов. – М. : Пищ. пром-ть, 1966. – 478 с.
89. Щербаков В. Г. Химия и биохимия переработки масличных семян / В. Г. Щербаков. – М. : Пищ. пром-ть, 1977. – 168 с.
90. Равич М. В. Эффективность использования топлива / М. В. Равич. – М. : Наука, 1975.
91. Рябинин Д. Д. Смесительные машины для пластмассо-резиновых смесей / Д. Д. Рябинин, Ю. Е. Лукач. – М. : Машиностроение, 1972. – 272 с.
92. Пат. 2078116 РФ, МКИ С 10 G 15/00. Способ крекинга нефти и нефтепродуктов и установка для его осуществления. – Опубл. [1997], бюл. № 6.
93. Пат. 2149886 РФ, МКИ С 10 G 32/00. Способ обработки нефти, нефтепродуктов, углеводородов. – Опубл. [2000], бюл. № 7.
94. Пат. 66220 РФ, МКИ В 01 F 3/00. Установка для приготовления мазутного топлива. – Опубл. [2007], бюл. № 25.
95. Бесов А. С. Деструкция углеводородов в кавитационной области в присутствии электрического поля при активации водными растворами электролитов / А. С. Бесов, К. Ю. Колтунов, С. О. Брулев и др. // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29. – Вып. 5. – С. 71–77.
96. Немчин А. Ф. Влияние кавитационного воздействия на углеводородное топливо / А. Ф. Немчин, В. А. Михайлик, Г. Т. Тодорашко, Е. В. Щепкин // Пром. теплотехника. – 2002. – Т. 24. – № 6. – С. 60–63.
97. Suslick S. K. The Chemical Effects of Ultrasound / Kenneth S. Suslick // Scientific American. – 1989. – February. – P. 80-86.
98. Промтов М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М. : Машиностроение, 2001. – 260 с.
99. Пилипенко А. Т. Справочник химика. – К. : Наук. думка, 1987. – 407 с.
100. Колосов О. Є. Технологічні засади виробництва паливних сумішей із використанням ріпакової олії / О. Є. Колосов, Г. Л. Рябцев, Д. Е. Сідоров та ін. // Вісн. НТУУ «КПІ», сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2010. – № 1. – С. 63-69.
101. Колосов О. Є. Ефективність виробництва біодизеля з використанням ультразвуку / О. Є. Колосов, Г. Л. Рябцев, Д. Е. Сідоров та ін. // Вісн. НТУУ «КПІ», сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2010. – № 2 (6). – С. 63-69.
102. Яхно О. М. Кавитация в переработке нефти / О. М. Яхно, А. Д. Коваль, Л. И. Пищенко и др. – К. : Світ, 1999. – 263 с.
103. А. с. 1269820 СССР. Кавитационный смеситель / О. В. Козюк, И. М. Федоткин, О. А. Балалаев. – Опубл. 15.11.86, бюл. № 42.
104. А. с. 1240439 СССР. Кавитационный смеситель / И. М. Федоткин, О. В. Козюк, О. А. Балалаев. – Опубл. 30.06.86, бюл. № 24.
105. А. с. 1240440 СССР. Кавитационный смеситель / И. М. Федоткин, О. В. Козюк, О. А. Балалаев. – Опубл. 30.06.86, бюл. № 24.
106. Пат. 48863 Україна. Спосіб підготовки та очистки рідини / О. М. Терентьев, О. В. Гаркот, Ю. Б. Синяков, О. Ф. Луговський (UA). – Опубл. 15.08.02, бюл. № 8.
107. Пристрій для ультразвукової обробки рідини в протоці / О. Ф. Луговський, В. І. Чорний, А. В. Мовчанок. – № а 2002107879 ; заявл. 03.10.02.
108. Луговський О. Ф. Застосування ультразвукових коливань у пристроях фільтрування рідини / О. Ф. Луговський, В. І. Чорний // Вестн. Нац. техн. ун-та України «Київ. політехн. ін-т», сер. «Машиностроение». – 1999. – Вып. 35. – С. 111-119.

109. Агранат Б. А. Ультразвуковая технология / Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский, Н. Н. Хавский ; под ред. Б. А. Аграната. – М. : Metallurgia, 1974. – 504 с.
110. Луговський О. Ф. Методика розрахунку ультразвукового диспергатора з радіально-згинними коливаннями до систем підготовки паливно-повітряної суміші / О. Ф. Луговський, В. І. Чорний // Вест. Нац. техн. ун-та України «Київ. політехн. ін-т», сер. «Машиностроєння». – 1999. – Вып. 34. – С. 79-87.
111. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.
112. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.
113. Луговський О. Ф. Методика розрахунку ультразвукового кавітаційного апарата з проточною камерою / О. Ф. Луговський // Вестн. Нац. техн. ун-та України «Київ. політехн. ін-т», сер. «Машиностроєння». – 2003. – № 1. – С. 50-56.
114. Колосов О. Є. Методика вибору ефективних конструктивно-технологічних параметрів пристроїв для ультразвукової модифікації рідких полімерних композицій та волокнистих наповнювачів / О. Є. Колосов // Вісн. НТУУ «КПІ», сер. «Машинобудування». – 2007. – № 50. – С. 27-34.
115. Луговской А. Ф. Методика расчета ультразвукового кавитационного устройства с излучающей пластиной / А. Ф. Луговской, А. Е. Колосов // Экологические и ресурсосбережение. – 2005. – № 1. – С. 59–67.
116. Луговской А. Ф. Расчет ультразвуковых диспергаторов с составными пьезоэлектрическими преобразователями / А. Ф. Луговской // Вестн. Нац. техн. ун-та Украины «Київ. політехн. ін-т», сер. «Машиностроєння». – 1998. – Вып. 33. – С.291-296.
117. Колосов А. Е. Особенности расчета ультразвуковых кавитаторов на базе пьезокерамических преобразователей с излучающей пластиной / А. Е. Колосов, А. Ф. Луговской, В. И. Сивецкий и др. // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : V промышл. конф. с междунар. участием и блиц-выставка : тез. докл. – Славское, 2005. – С. 252-253.
118. Дослідження, розробка та впровадження технології та устаткування для створення в Україні виробництва дизельного палива з використанням ріпакової олії : звіт про НДР № 2828 (закл.) / НТУУ «КПІ» ; МОН України ; керівн. Ю. Лукач; викон. Ю. Лукач, В. Доброногов, І. Мікульонок та ін. – К., 1996. – 67 с. – Держреєстр. в УкрІНТЕІ № 0196U012308.
119. Колосов А. Є. Розроблення і патентування методики розрахунку ультразвукового кавітаційного пристрою з випромінюючою пластиною, що використовується для ультразвукової модифікації рідких епоксидних композицій та інтенсифікації процесів просочування і дозованого нанесення / А. Є. Колосов // Прогресивна техніка і технологія–2009 : X міжнар. конф. : тез. доп. – Севастополь, 2009. – С.92.
120. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества / П. П. Кремлевский. – Л. : Машиностроение. 1975. – 776 с.
121. Лапин В. А. Экспериментальное исследование влияния стенок на основные размеры каверн за дисками, расположенными по оси круглой трубы / В. А. Лапин // Проектирование и мореходные качества промысловых судов : Тр. КТИИПиХ МРХ СССР. – 1975. – Вып. 59. – С. 53-57.
122. Лапин В. А. Экспериментальное исследование развитых кавитационных течений : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В. А. Лапин. – Калининград, 1975. – 27 с.
123. Мачинский А. С. Гидродинамические и теплообменные характеристики суперкавитационных испарительных аппаратов для обессоливания жидкостей : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Киев, 1984. – 18 с.
124. Щербатенко Л. Е. Влияние термодинамического эффекта на кавитацию в шнековых и центробежных насосах / Л. Е. Щербатенко, А. С. Шапиро // Хим. и нефтяное машиностр. – 1981. – № 8. – С. 17-20.

125. Федоткин И. М. Гидродинамические характеристики вентилируемых каверн в ограниченных потоках / И. М. Федоткин, А. С. Мачинский, Н. А. Яхова // Хим. машиностр. : респ. межвед. научно-техн. сб. – 1990. – Вып. 51. – С. 58-64.
126. Ландау Л. Д. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 736 с.
127. Федоткин И. М. К расчету реактора с циркуляционным контуром / И. М. Федоткин, А. С. Мачинский, Н. А. Яхова. – № 640-деп ; деп. 01.04.85 в УкрНИИНТИ.
128. А. с. 1114435 СССР, МКИ В 01 D 19/00. Устройство для дегазации жидкости / И. М. Федоткин, А. С. Мачинский, А. Ф. Немчин, Н. А. Яхова (СССР). – № 3507564/23-26 ; заявл. 03.11.82 ; опубл. 23.09.84, бюл. № 35.
129. СНИП 2.04.03-85.
130. Методика технологического контроля работы очистных сооружений городской канализации. – М.: Стройиздат, 1977. – 184 с.
131. А. с. 1536076 СССР, МКИ F 04 F 5/04. Эжектор / А. С. Мачинский, Н. А. Яхова, С. В. Волейник (СССР). – № 4409985/25-29 ; заявл. 15.04.88; опубл. 15.01.90, бюл. № 2.
132. А. с. 1197714 СССР, МКИ В 01 F 5/00. Кавитационный смеситель / И. М. Федоткин, Н. А. Яхова, Л. И. Пищенко (СССР). – № 3682145/23-26 ; заявл. 09.11.83 ; опубл. 15.12.85, бюл. № 46.
133. А. с. 1708775 СССР, МКИ В 01 D 19/00. Способ окисления сточных вод и устройство для его осуществления / Н. А. Яхова, А. С. Мачинский, Н. Н. Марутовская (СССР). – № 4752881 ; заявл. 22.08.89 ; опубл. 30.01.94, бюл. № 4.
134. А. с. 1268926 СССР, МКИ F 28 C 3/06. Контактный теплообменник / Н. А. Яхова, А. С. Мачинский, Н. Н. Марутовская (СССР). – № 3912033/24-06 ; заявл. 17.06.85; опубл. 07.11.86, бюл. № 41.
135. А. с. 1733388 СССР, МКИ С 02 F 1/20. Способ дегазации жидкости и устройство для его осуществления / Н. А. Яхова, А. С. Мачинский, А. В. Туч и др. (СССР). – № 4802632/26 ; заявл. 05.02.90; опубл. 15.05.92; бюл. № 18.
136. Козулин Ю. В. Исследование и разработка кавитационного метода обессоливания сульфатной целлюлозы : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. В. Козулин. – Л., 1997. – 20 с.
137. Колосов О. Є. Аналіз сучасних технічних засобів виробництва біодизельного палива / О. Є. Колосов, Д. Е. Сідоров, Г. Л. Рябцев та ін. // Композиционные материалы в промышленности : XXX ежегодн. научн.-практич. конф. с междунар. участием и блиц-выставка : тез. докл. – Ялта, 2010. – С. 244-245.
138. Рішення про видачу пат. України на кор. мод. МПК (2009) С 10 L 1/00, F 24 Н 4/00. Модульна біодизельна установка / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. С. Сахаров та ін. – № u201007115 ; заявл. 09.06.10.
139. Рішення про видачу пат. України на кор. мод. МПК (2009) С 10 L 1/00, F 24 Н 4/00. Спосіб побудови і експлуатації модульної біодизельної установки / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. С. Сахаров та ін. – № u201007118 ; заявл. 09.06.10.
140. Рішення про видачу пат. України на кор. мод. МПК (2009) С 10 L 1/00, F 24 Н 4/00. Спосіб одержання біопалива для дизеля / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. С. Сахаров та ін. – № u 201007117 ; заявл. 09.06.10.
141. Рішення про видачу пат. України на кор. мод. МПК (2009) С 10 L 1/00, F 24 Н 4/00. Спосіб одержання паливних сумішей на основі ефірів жирних кислот ріпакової олії / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. С. Сахаров та ін. – № u201007119 ; заявл. 09.06.10.
142. Рішення про видачу пат. України на кор. мод. МПК (2009) С 10 L 1/00, F 24 Н 4/00. Спосіб одержання ефірів жирних кислот ріпакової олії / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. С. Сахаров та ін. – № u 201007116 ; заявл. 09.06.2010.

