

*А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, А.О. Прохоренко, А.В. Савченко, О.О. Осетров, Д.В. Мешков*

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ В ДИЗЕЛІ ПРИ РОБОТІ НА ВОДОПАЛИВНІЙ ЕМУЛЬСІЇ

*Проаналізовано фізико-хімічні властивості водопаливної емульсії та їх вплив на процеси сумішоутворення та згоряння палива. Наведено методику проведення та результати експериментальних досліджень дизеля 4ЧН12/14 на водопаливній емульсії. Проаналізовано основні гіпотези, що розкривають механізм впливу водопаливної емульсії на процеси сумішоутворення та згоряння: гіпотезу «мікрровибухів» та гіпотезу каталітичного впливу продуктів дисоціації води на процес згоряння. За результатами досліджень зроблені висновки про ступінь впливу кожного з механізмів протягом окремих періодів згоряння.*

### Вступ

В даний час не викликає сумнівів актуальність проблеми забезпечення енергозбереження та екологічної безпеки при розробці та використанні двигунів внутрішнього згоряння. Проте часто є проблематичним дотримання балансу між екологічними і паливно-економічними показниками двигуна, оскільки заходи з покращення одних показників часто призводять до погіршення інших.

Одним із ефективних заходів забезпечення енергозбереження, одночасного покращення економічних і екологічних показників двигунів є використання альтернативних палив, зокрема водопаливних емульсій (ВПЕ) із вмістом води від 10 до 30%. Проте неоднозначними є гіпотези щодо розкриття механізму впливу властивостей ВПЕ на процеси згоряння.

В роботі на основі експериментальних даних здійснена спроба розкрити особливості сумішоутворення і згоряння в дизелі при роботі на ВПЕ.

### Аналіз попередніх досліджень

Використання ВПЕ дозволяє покращити паливно-економічні та екологічні показники двигунів [1-9].

Відзначається суттєвий вплив ВПЕ на викиди з відпрацьованими газами (ВГ) оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ). Зниження викидів  $\text{NO}_x$  становить від 25% [2,9,10] до 70% [1,6] залежно від режиму роботи, складу та рівня дисперсності ВПЕ, конструктивних та регулювальних параметрів дизеля. Зниження викидів  $\text{NO}_x$  пов'язують із зменшенням максимальної температури циклу на 25-45 К [1-2,6-10].

Застосування ВПЕ призводить до зменшення димності, викидів твердих частинок з ВГ дизеля на 15-40% [1,5,9,10] та викидів  $\text{CO}$  – на 10-15% [1,2,6-10] залежно від умов проведення досліджень.

Дані щодо впливу властивостей ВПЕ на витрату палива і викиди незгорілих вуглеводнів з ВГ дизеля є суперечливими. Відзначають як зменшення питомої витрати палива на 3,5-5% [1,5-7,9,10], так і збільшення цього показника на 2-4% [2], а та-

кож як зниження викидів  $\text{CH}$  на 60-90% так і їх підвищення на 20-30% [1,2,6-8].

Очевидно, що ці показники значною мірою залежать від конструктивних та регулювальних параметрів дизеля, режиму роботи, особливостей протікання робочого процесу, складу ВПЕ та рівня її дисперсності.

Як правило, відзначають інтенсифікацію процесу згоряння палива в циліндрі дизелів при використанні ВПЕ [1,2,7,9,10]. Зміни у протіканні процесу згоряння пояснюють впливом властивостей ВПЕ на процеси впорскування, сумішоутворення і випаровування палива [1,2,5-8], збільшенням теплоємності палива і втрат теплоти на випаровування води [1,2,4-7], явищами мікрровибуху [1,2,4-7,11] та каталітичним впливом продуктів дисоціації води на процес згоряння [1,2,5,8,12,14]. Наявність різних гіпотез щодо механізму впливу властивостей ВПЕ на процеси сумішоутворення і згоряння вимагає додаткових досліджень у цьому напрямку.

За результатами аналізу виконаних досліджень щодо використання паливних емульсій в ДВЗ можна зробити висновок про відсутність однозначної оцінки ефективності їх використання. Суперечливими є дані про вплив властивостей ВПЕ на процеси згоряння в ДВЗ. Бракує рекомендацій щодо вибору раціонального складу ВПЕ і адаптації двигунів для роботи на ВПЕ.

Вищезгадане обумовлює актуальність дослідження впливу властивостей ВПЕ на процеси сумішоутворення і згоряння в дизелі.

### Методика проведення досліджень

Дослідження проведені на автотракторному дизелі 4ЧН12/14 з безпосереднім впорскуванням палива в камеру згоряння в поршні, газотурбінним наддувом та проміжним охолодженням наддувального повітря.

Дизель було встановлено на випробувальний стенд, що укомплектований необхідним обладнанням і контрольно-вимірювальними приладами відповідно до діючих нормативів.

Дослідження проведені на стандартному дизельному паливі та ВПЕ при частотах обертання колінчастого валу  $2000 \text{ хв}^{-1}$  і  $1500 \text{ хв}^{-1}$ . На кожному режимі визначалися індикаторні діаграми, переміщення голки форсунки та тиск палива перед форсункою. Кут випередження впорскування палива не змінювався.

Обробка результатів вимірювань здійснювалася за допомогою програмного комплексу DieselAnalyse, що розроблено на кафедрі ДВЗ НТУ «ХП». Цей комплекс дозволяє проводити визначення верхньої мертвої точки (ВМТ), дроблення на окремі послідовні цикли роботи ДВЗ по 720 значень ординат тисків, усереднення по заданому числу робочих циклів, визначати середню частоту обертання колінчастого валу, проводити інтерполяцію, згладжування, визначення абсолютного тиску і корекцію положення нульової лінії тиску. Результатом роботи програми є масив значень тиску в циклі, індикаторні показники, закон ефективного тепловиділення, швидкість наростання тиску в циліндрі.

На основі попередніх досліджень із забезпечення тривалого терміну стабільного складу ВПЕ, комплексного позитивного впливу на паливну економічність, токсичність і димність ВГ, нагароутворення, забезпечення безвідмовності на рівні використання стандартного дизельного палива для випробувань було обрано ВПЕ із вмістом води по об'єму 16,3%. Основні фізико-хімічні властивості ДП і ВПЕ наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні фізико-хімічні показники ДП і ВПЕ

| Назва показника   | ДП       | ВПЕ              |
|---|----------|------------------|
| Густина при температурі $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\text{кг/м}^3$                                 | 829      | 857              |
| Теплоємність, $\text{кДж/кг}\cdot\text{K}$  | 2,02     | 2,37             |
| Питома нижня теплота згоряння палива, $\text{кДж/кг}$   | 42500    | 35100            |
| Масова частина сірки, % не більше   | 0,01     | 0,01             |
| Температура спалахування в закритому тигелі, $^\circ\text{C}$ , не нижче                              | 70,5     | спалах відсутній |
| Вміст води, %   | 0        | 16,3             |
| Випробування на мідній пластинці  | Випримує | Випримує         |
| Кінематична в'язкість при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\text{мм}^2/\text{с}$ не більше* | 5,15     | 6,19             |
| Гранична температура фільтрування, $^\circ\text{C}$ , не вище   | -12      | -5               |
| Дисперсність води в паливі, $\mu\text{м}$   | 0        | 0,5...1,0        |

\*Кінематична в'язкість ВПЕ розрахована за формулою Тейлора [15].

Порівняльний аналіз характеристик вказує на те, що наявність води у ВПЕ на 17,5% зменшує нижню питому теплоту згоряння палива. Отже, для отримання незмінної потужності двигуна потрібно збільшувати циклову подачу палива. Це має спричинити підвищення максимального тиску впорскування.

Густина ВПЕ на 2,5% більша за густину ДП, що сприяє збільшенню далекобійності паливного факела.

В'язкість ВПЕ приблизно на 7% більша за в'язкість ДП, що має викликати збільшення тиску впорскування та розмірів крапель палива, а також зменшення кута конусу паливного факела.

Характерною особливістю ВПЕ є відсутність спалахування в закритому тигелі. Це підвищує рівень пожежної безпеки використання ВПЕ порівняно з ДП.

Теплоємність ВПЕ вища за теплоємність ДП, що має привести до збільшення витрат теплоти на прогрів та випаровування крапель палива, а також до збільшення тривалості цих процесів.

До того ж більша стискальність ВПЕ за ДП на 15-18% [1,2,13] має спричинити збільшення тривалості процесу підвищення тиску перед форсункою у порівнянні з використанням ДП. Отже, при незмінному установчому куті випередження впорскування палива, момент початку впорскування при використанні ВПЕ може бути дещо ближчий до ВМТ порівняно з ДП. В ході закінчення процесу впорскування ВПЕ швидкість зниження тиску палива у паливопроводі також може бути дещо меншою порівняно з ДП.

Вміст води у паливі викликає підвищення граничної температури фільтрування, що може призвести до проблем зберігання, прокачування по паливопроводах і фільтрації ВПЕ при низьких температурах навколишнього середовища.

Вказані відмінності головним чином обумовлюють зміни у протіканні процесів сумішоутворення і згоряння в дизелі.

#### Аналіз результатів експериментального дослідження

Для аналізу результатів досліджень використані індикаторні діаграми, залежності зміни тиску палива перед форсункою, характеристики диференційного тепловиділення, залежності зміни температури та швидкості підвищення тиску в циліндрі дизеля при роботі на ДП і ВПЕ.

З індикаторних діаграм (рис. 1) видно, що максимальний тиск циклу при роботі на ДП більше, ніж при роботі на ВПЕ, є відмінності на стадії наростання тиску від моменту початку згоряння до моменту досягнення максимального тиску. Для

виявлення причин цих відмінностей було проаналізовано процеси впорскування палива і згоряння в

циліндрі.

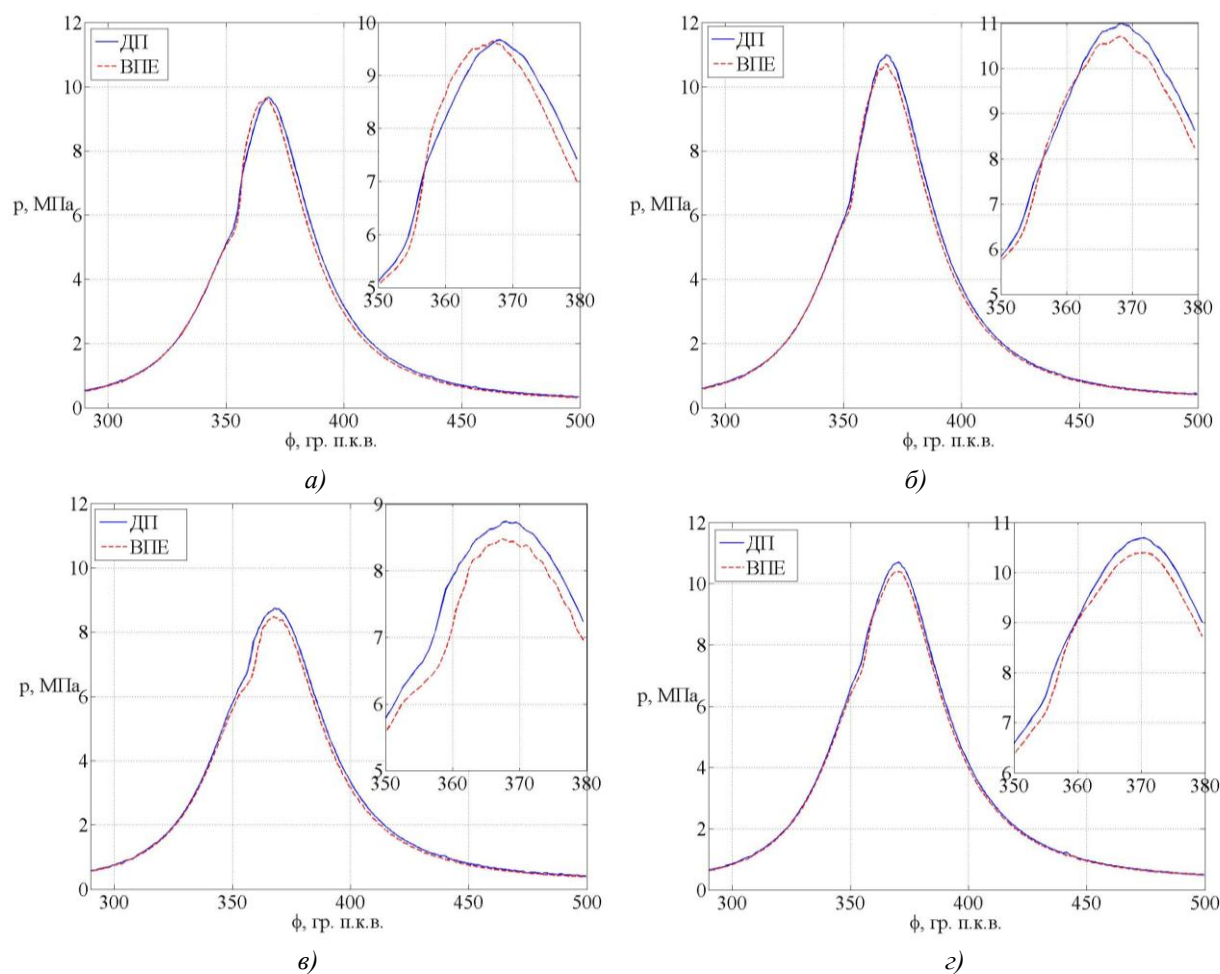


Рис. 1. Індикаторні діаграми при роботі на ДП та ВПЕ:  
 а –  $n=1500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=64 \text{ кВт}$ ; б –  $n=1500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=85 \text{ кВт}$ ; в –  $n=2000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=73,6 \text{ кВт}$ ;  
 з –  $n=2000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=100 \text{ кВт}$

З наведених залежностей зміни тиску палива перед форсункою від кута повороту колінчастого вала (рис. 2) видно, що моменти початку впорскування ВПЕ і ДП майже співпадають. Деяко більш ранній початок впорскування ДП пояснюється меншою його стискальністю. Впорскування ВПЕ на 3-5 град. п.к.в. більш тривале, ніж ДП, що пояснюється збільшенням циклової подачі ВПЕ при однаковій потужності.

Внаслідок збільшення циклової подачі та збільшення в'язкості палива максимальний тиск впорскування ВПЕ зростає на 14-18 %, що може призводити до покращення розпилювання палива.

Розрахункові значення температур у циліндрі двигуна наведено на рис. 3. Видно, що температура в циліндрі при використанні ВПЕ знижується на 15-30 К. Зазначене зниження температури пояснюється збільшенням теплоємності циклової подачі

при використанні ВПЕ, а отже і витрат теплоти на нагрів та випаровування палива.

Зниження максимальної температури в циліндрі та зменшення тривалості процесу згоряння мають вчинити позитивний вплив на зниження рівня викидів оксидів азоту з ВГ дизеля. Це підтверджується багатьма експериментальними дослідженнями використання ВПЕ в дизелях [1,2,5-10].

Тепловиділення в циліндрі при використанні ВПЕ починається пізніше на 3-5 град. п.к.в., ніж при використанні ДП (рис. 4). Зважаючи на майже однаковий момент впорскування обох видів палива збільшення на 2-4 град. п.к.в. періоду затримки запалювання при використанні ВПЕ може пояснюватися зростанням енергії активації палива та зниженням температури та тиску в циліндрі в момент початку впорскування палива.

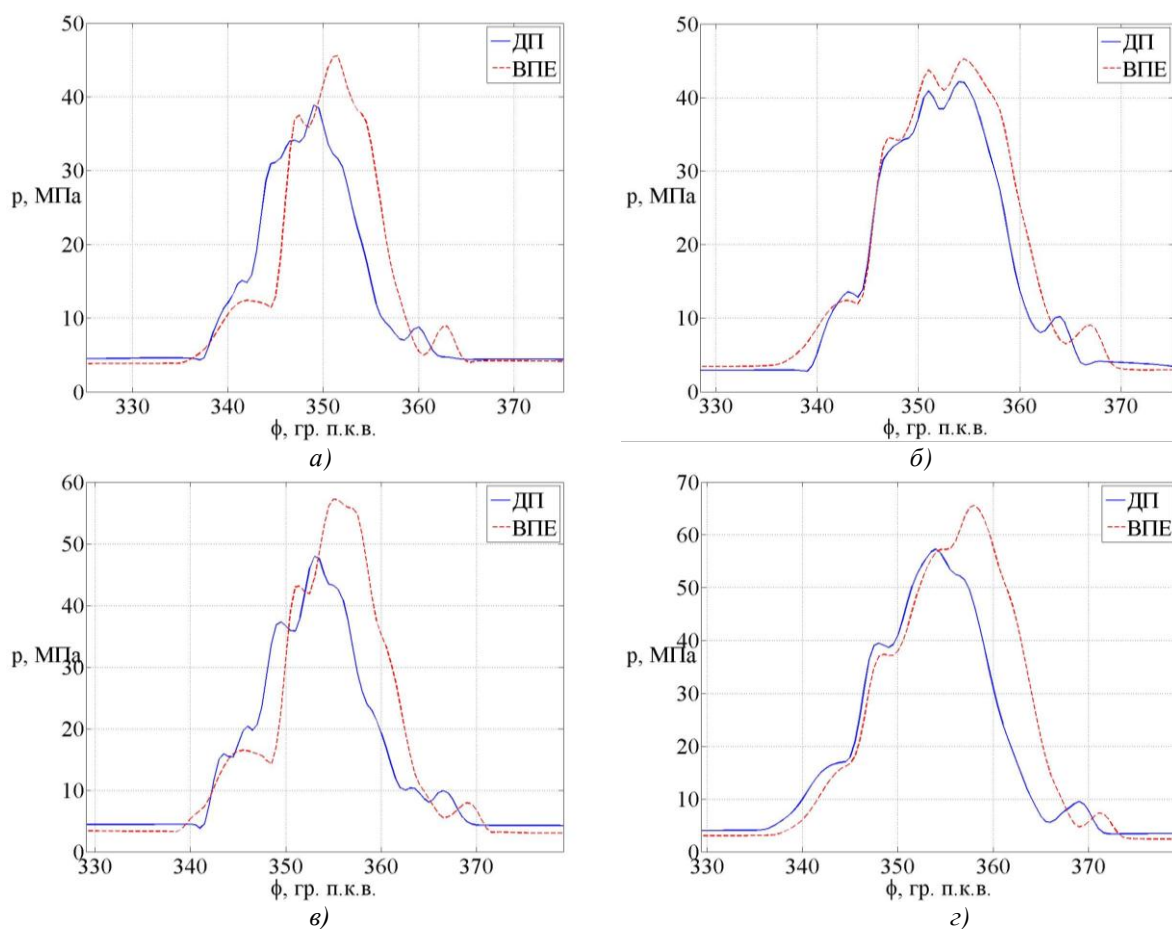


Рис. 2. Тиск палива перед форсункою при роботі на ДП та ВПЕ:

$a - n=1500 \text{ хв}^{-1} N_e=64 \text{ кВт}$ ;  $б - n=1500 \text{ хв}^{-1} N_e=85 \text{ кВт}$ ;

$в - n=2000 \text{ хв}^{-1}, N_e=73,6 \text{ кВт}$ ;  $г - n=2000 \text{ хв}^{-1}, N_e=100 \text{ кВт}$

Максимальна швидкість згоряння і площа під кривою тепловиділення в ході періоду спалаху для ВПЕ більше, ніж для ДП. Цей факт можна пояснити тим, що за більш тривалий період затримки запалення встигає випаруватися більша кількість палива. Відповідно збільшується частка палива, що згорає за період швидкого згоряння і швидкість тепловиділення в цей період.

Аналіз процесу дифузійного згоряння показує, що в цей період згоряння швидкість тепловиділення при згорянні ВПЕ вища, ніж при згорянні ДП.

Момент закінчення згоряння (досягнення моменту рівності нулю швидкості тепловиділення) ДП і ВПЕ приблизно однаковий. З урахуванням більш пізнього моменту початку згоряння ВПЕ можна зробити висновок про те, що тривалість згоряння ВПЕ менша, ніж згоряння ДП незважаючи на те, що теплоємність ВПЕ більше, ніж ДП. Це підтверджує зростання швидкості згоряння ВПЕ порівняно з ДП.

Відомо декілька гіпотез, що розкривають механізм впливу ВПЕ на процеси згоряння в дизелях. В рамках однієї з гіпотез вплив ВПЕ пояснюють насамперед каталітичним впливом продуктів

дисоціації води на процес згоряння палива. В умовах високих температур камери згоряння дизеля водяна пара дисоціює на водень та кисень, а також на радикали водню та гідроксильні групи. Наявність у камері згоряння радикалів водню сприяє прискоренню хімічних реакцій та більш повному вигоранню вуглеводнів.

Автори іншої гіпотези схильні пояснювати вплив ВПЕ на робочий процес дизеля вторинним розпилюванням палива у камері згоряння внаслідок скипання води («мікробухів»), що знаходиться всередині краплі ВПЕ.

Наявність механізму вторинного розпилювання палива (явища «мікробуху») підтверджують детальні дослідження горіння крапель ВПЕ [2,4], в ході яких була використана високошвидкісна відео зйомка.

Про каталітичний вплив продуктів дисоціації води на процеси згоряння палива в циліндрі дизеля можна судити за результатами ряду досліджень додавання водяної пари до повітря на впуску в двигун [1,3,12]. Вплив такого заходу на швидкість процесу згоряння якісно нагадує вплив ВПЕ.

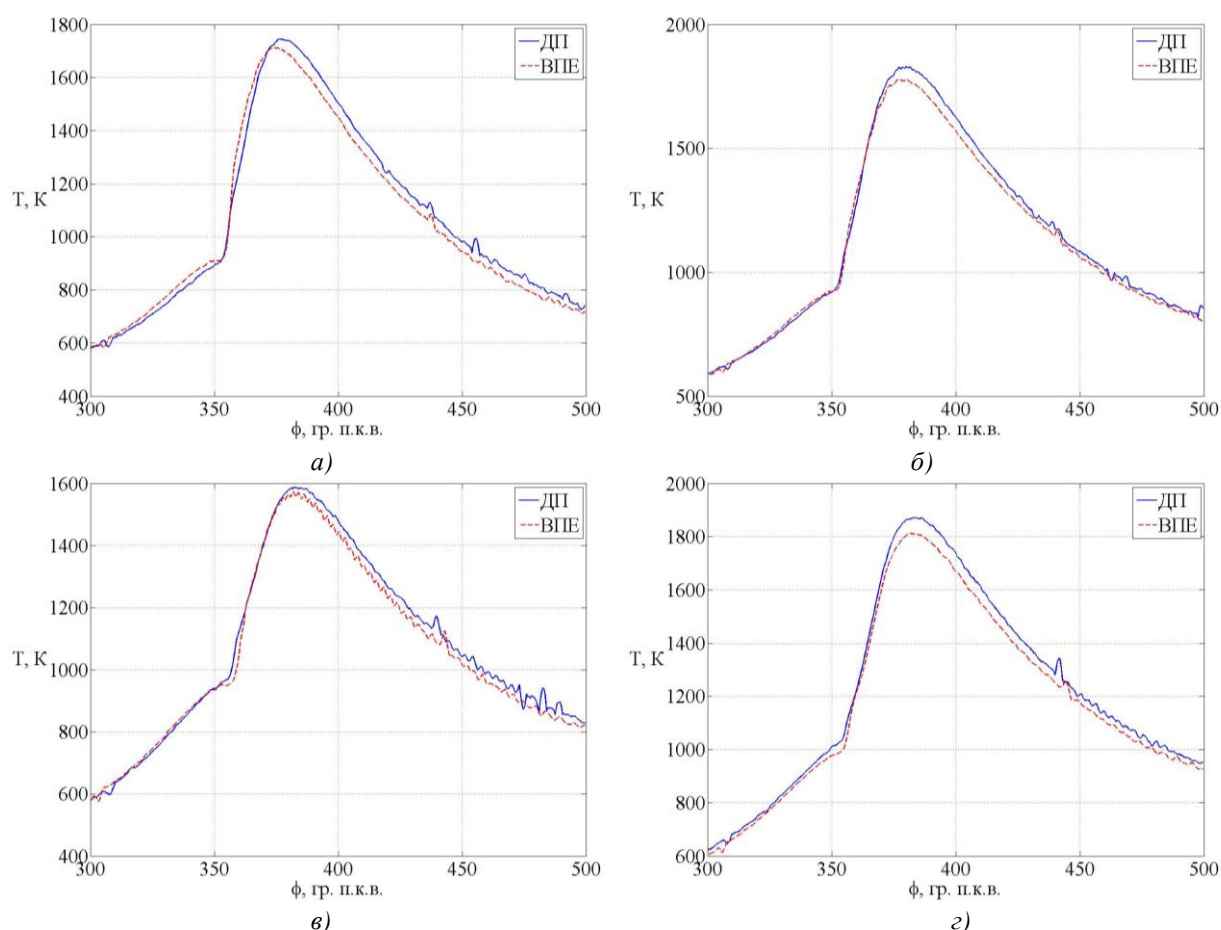


Рис. 3. Температура в цилиндре дизеля при работе на ДП та ВПЕ:

а –  $n=1500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=64 \text{ кВт}$ ; б –  $n=1500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=85 \text{ кВт}$ ; в –  $n=2000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=73,6 \text{ кВт}$ ;  
г –  $n=2000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=100 \text{ кВт}$

З аналізу характеристик диференційного тепловиділення дослідженого дизеля є підстави вважати, що при згорянні ВПЕ мають місце обидва механізми впливу.

Явище «мікробибуху» може вчиняти істотний вплив на процеси в цилиндрі дизеля в початковий період згорання. Саме на початку згорання дисперсність розпилювання палива вчиняє найбільший позитивний вплив на процес згорання і вторинне розпилювання палива внаслідок явища «мікробибуху» може сприяти покращенню згорання.

Варто відзначити, що у сучасних дизелях досягається достатньо висока дисперсність розпилювання палива, а отже, потенціал з покращення процесу згорання за допомогою підвищення дисперсності палива у камері згорання є у значній мірі вичерпанним.

Результати досліджень свідчать, що саме протягом дифузійного згорання і догорання палива за рахунок каталітичного впливу радикалів водню і гідроксильних груп підвищується швидкість згорання ВПЕ. Очевидно, що в цей період локальна концентрація активних радикалів значна у безпосе-

редній близькості до крапель незгорілого палива і сприяє його вигоранню.

Підсумовуючи можна відзначити, що фактор каталітичного впливу продуктів дисоціації води є превалюючим у позитивному впливі ВПЕ на процес згорання в дизелі.

### Висновки

Проведені дослідження автотракторного дизеля дозволяють визначити особливості процесів сумішоутворення та згорання ВПЕ.

ВПЕ із вмістом води 16,3% по вазі, з якою було проведено дослідження, має нижню питому теплоту згорання на 17,5% меншу, ніж ДП, в'язкість на 7% більшу за ДП, стискальність на 15-18% більшу, ніж ДП.

Максимальний тиск впорскування ВПЕ вище на 8-12 МПа, а тривалість процесу впорскування – на 3-4 град. п.к.в. більша, ніж ДП внаслідок збільшення циклової подачі для забезпечення незмінної потужності дизеля.

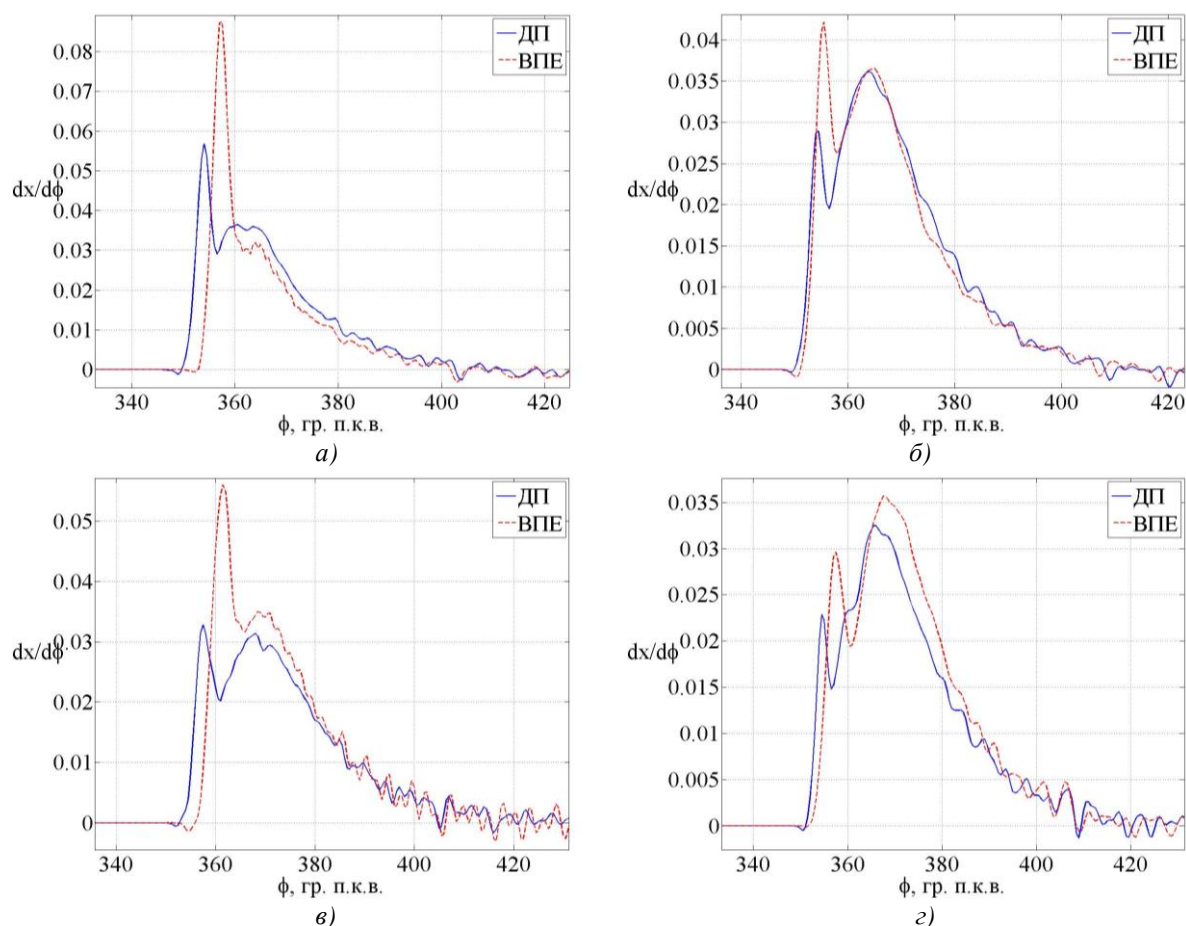


Рис. 4. Характеристика диференційного тепловиділення дизеля при роботі на ДП та ВПЕ:

а –  $n=1500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=64 \text{ кВт}$ ; б –  $n=1500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=85 \text{ кВт}$ ;  
 в –  $n=2000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=73,6 \text{ кВт}$ ; г –  $n=2000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=100 \text{ кВт}$

Температура в циліндрі дизеля зменшується на 10-30 К. Зниження максимальної температури в циліндрі поряд зі зменшенням тривалості процесу згоряння є основними чинниками, що обумовлюють зниження рівня викидів оксидів азоту з ВГ дизеля.

Період затримки спалахування палива при використанні ВПЕ збільшується на 1-3 град. п.к.в., що, в свою чергу, призводить до збільшення частки палива, яка випаровується за цей період, а отже – до збільшення швидкості тепловиділення в період спалахування палива. Тривалість процесу згоряння ВПЕ на 2-5 град. п.к.в. менша, ніж ДП, незважаючи на більшу тривалість процесу впорскування палива.

Результати експериментальних досліджень дозволяють оцінити ступінь впливу двох основних гіпотез, що розкривають механізм впливу ВПЕ на процес згоряння палива в дизелі: каталітичного впливу продуктів дисоціації води на хімічні реакції в циліндрі та вторинного розпилювання палива внаслідок скипання води всередині крапель ВПЕ (гіпотеза «мікрровибухів»). Ефект від використання

ВПЕ на процес згоряння в дизелі обумовлений комплексною дією обох механізмів впливу. Протягом початкових періодів згоряння вторинне розпилювання палива вчиняє помітний вплив на процес згоряння. В цілому превалюючим чинником є каталітичний вплив продуктів дисоціації води на хімічні реакції в циліндрі дизеля.

#### Список літератури:

1. Abu-Zaid M. Performance of single cylinder, direct injection diesel engine using water fuel emulsions / M. Abu-Zaid // *Energy Conversion and Management*. – 2004. – № 45. – С. 697-705.
2. Experimental investigation of the performance and emission characteristics of direct injection diesel engine by water emulsion diesel under varying engine load condition / M. Fahd, Y. Wenming, P. Lee [u др.] // *Applied Energy*. – 2013. – № 102. – С. 1042-1049.
3. Greeves G. Effects of water introduction on diesel engine combustion and emission / G. Greeves, I. M. Khan, G. Onion // *Power systems*. – 1977. - № 1. – С. 321-336.
4. Water-coalescence in an oil-in-water emulsion droplet burning under microgravity / D. Segawa, H. Yamasaki, T. Kadota [u др.] // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2000. – № 28. – С. 985-990.
5. Engine performance using emulsified diesel fuel / A. Alahmer, J. Yamin, A. Sakhrieh, M.A. Hamdan // *Energy Conversion and Management*. - 2010. - № 51. – С. 1708-

1713. 6. Performance, emissions and heat release characteristics of direct injection diesel engine operating on diesel oil emulsion / J. Ghojel, D. Homnery, K. Al-Khaleefi // *Applied Thermal Engineering*. – № 26. – 2006. – С. 2132–2141. 7. Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel / O. Armas, R. Ballesteros, F.J. Martos, J.R. Agudelo // *Fuel*. – 2005. – № 84. – С. 1011–1018. 8. Кульчицкий А. Р. Улучшение экологических характеристик дизелей применением водотопливных эмульсий / А. Р. Кульчицкий, А. М. Аттия, А. Н. Гоц // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10. – С. 1419–1422. 9. Патров Ф. В. Снижение концентрации оксидов азота в отработавших газах судовых дизелей при использовании водотопливных эмульсий / В. Ф. Патров, О. С. Вахромеев // *Вестник АГТУ*. – 2010. – № 1. – С. 141–146. 10. Патров Ф. В. Использование водотопливной эмульсии при эксплуатации судовых ДВС / В. Ф. Патров, О. С. Вахромеев // *Вестник АГТУ* – 2009. – № 1. – С. 223–225. 11. Белов Е.А. Изменение ресурсных показателей дизеля 6ЧН18/22 при работе на водотопливной эмульсии / Е.А. Белов, И.Г. Мироненко, Л.О. Соловьёва // *Ползуновский вестник*. – 2004. – № 1 – С. 202–205. 12. Левина Е. Ю. Физическая модель процесса горения водно-био-топливных эмульсий в дизелях / Е. Ю. Левина, С. А. Нагорнов // *Потенциал современной науки*. – 2015. – № 2. – С. 42–49. 13. Горелик Г. Б. Физико-механические параметры водотопливной эмульсии / Г. Б. Горелик, О. М. Протасов // *Ученые заметки ТОГУ*. – 2014. – Том 5. – № 1. – С. 288 – 293. 14. Левина Е. Ю. Обзор свойств современных водно-топливных эмульсий / Е. Ю. Левина // *Потенциал современной науки*. – 2014. – № 6. – С. 34–38. 15. Никольский Б.П. *Справочник химика. Том 2. Основные свойства неорганических и органических соединений* / Б.П. Никольский, О.Н. Григоров, М.Е. Позин / 3-е издание. Л.: Химия, 1971. – 1168 с.
- diesel engine by water emulsion diesel under varying engine load condition / M. Fahd, Y. Wenming, P. Lee [u др.] // *Applied Energy*. – 2013. – № 102. – С. 1042–1049. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.06.041 3. Greeves G. Effects of water introduction on diesel engine combustion and emission / G. Greeves, I. M. Khan, G. Onion // *Power systems*. – 1977. – № 1. – С. 321–336., DOI: 10.1016/S0082-0784(77)80335-4 4. Water-coalescence in an oil-in-water emulsion droplet burning under microgravity / D. Segawa, H. Yamasaki, T. Kadota [u др.] // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2000. – № 28. – С. 985–990. DOI: 10.1016/S0082-0784(00)80305-7 5. Engine performance using emulsified diesel fuel / A. Alahmer, J. Yamin, A. Sakhrieh, M.A. Hamdan // *Energy Conversion and Management*. – 2010. – № 51. – С. 1708–1713. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.11.0446 . Performance, emissions and heat release characteristics of direct injection diesel engine operating on diesel oil emulsion / J. Ghojel, D. Homnery, K. Al-Khaleefi // *Applied Thermal Engineering*. – № 26. – 2006. – С. 2132–2141. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.04.014 7. Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel / O. Armas, R. Ballesteros, F.J. Martos, J.R. Agudelo // *Fuel*. – 2005. – № 84. – С. 1011–1018. doi:10.1016/j.fuel.2004.11.015 8. Кульчицкий А. Р. Улучшение экологических характеристик дизелей применением водотопливных эмульсий / А. Р. Кульчицкий, А. М. Аттия, А. Н. Гоц // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10. – С. 1419–1422. 9. Патров Ф. В. Снижение концентрации оксидов азота в отработавших газах судовых дизелей при использовании водотопливных эмульсий / В. Ф. Патров, О. С. Вахромеев // *Вестник АГТУ*. – 2010. – № 1. – С. 141–146. 10. Патров Ф. В. Использование водотопливной эмульсии при эксплуатации судовых ДВС / В. Ф. Патров, О. С. Вахромеев // *Вестник АГТУ* – 2009. – № 1. – С. 223–225. 11. Белов Е.А. Изменение ресурсных показателей дизеля 6ЧН18/22 при работе на водотопливной эмульсии / Е.А. Белов, И.Г. Мироненко, Л.О. Соловьёва // *Ползуновский вестник*. – 2004. – № 1 – С. 202–205. 12. Левина Е. Ю. Физическая модель процесса горения водно-био-топливных эмульсий в дизелях / Е. Ю. Левина, С. А. Нагорнов // *Потенциал современной науки*. – 2015. – № 2. – С. 42–49. 13. Горелик Г. Б. Физико-механические параметры водотопливной эмульсии / Г. Б. Горелик, О. М. Протасов // *Ученые заметки ТОГУ*. – 2014. – Том 5. – № 1. – С. 288 – 293. 14. Левина Е. Ю. Обзор свойств современных водно-топливных эмульсий / Е. Ю. Левина // *Потенциал современной науки*. – 2014. – № 6. – С. 34–38. 15. Никольский Б.П. *Справочник химика. Том 2. Основные свойства неорганических и органических соединений* / Б.П. Никольский, О.Н. Григоров, М.Е. Позин / 3-е издание. Л.: Химия, 1971. – 1168 с.

#### **Bibliography (transliterated):**

1. Abu-Zaid M. Performance of single cylinder, direct injection diesel engine using water fuel emulsions / M. Abu-Zaid // *Energy Conversion and Management*. – 2004. – № 45. – С. 697–705. doi:10.1016/S0196-8904(03)00179-1 2. Experimental investigation of the performance and emission characteristics of direct injection

Поступила 24.06.2016 г.

**Марченко Андрій Петрович** – д.т.н., проф., проректор з наукової роботи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua.

**Парсаданов Ігор Володимирович** – д.т.н., проф., головний науковий співробітник кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: parsadanov@kpi.kharkov.ua.

**Прохоренко Андрій Олексійович** – д.т.н., проф., професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: prokhorenko@kpi.kharkov.ua.

**Савченко Анатолій Вікторович** – аспірант кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Savchenko.sci@gmail.com.

**Осетров Олександр Олександрович** – к.т.н., доц., доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: osetrov2010@gmail.com.

**Мешков Денис Вікторович** – к.т.н., доц., доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: denys.meshkov@mail.ru.

### **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В ДИЗЕЛЕ ПРИ РАБОТЕ НА ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ**

**А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, А.А. Прохоренко, А.В. Савченко, А.А. Осетров, Д.В. Мешков**

Проанализированы физико-химические свойства водотопливной эмульсии и их влияние на процессы смесеобразования и сгорания топлива. Приведена методика проведения и результаты экспериментальных исследований дизеля 4ЧН12/14 на водотопливной эмульсии. Проанализированы основные гипотезы, раскрывающие механизм влияния водотопливной эмульсии на процессы смесеобразования и сгорания: гипотеза «микровзрывов» и гипотеза каталитического

воздействия продуктов диссоциации воды на процесс сгорания. По результатам исследований сделаны выводы о степени влияния каждого из механизмов в течении отдельных периодов сгорания.

#### FEATURES COMBUSTION PROCESS IN DIESEL ENGINES WHEN WORKING AT WATER-FUEL EMULSION

*A.P. Marchenko, I.V. Parsadanov, A.A. Prokhorenko, A.V. Savchenko, A.A. Osetrov, D.V. Meshkov*

Analyzed the physical-chemical properties of water-fuel emulsion and their effect on mixture formation and combustion of fuel. Method of holding and results of experimental research of diesel engine 4CHN12 / 14 on water-fuel emulsion. Analyzed the main hypothesis, revealing the effect mechanism of water emulsion fuel mixture formation and combustion processes: hypothesis of "micro-explosions" hypothesis and catalytic effects of products of dissociation of water in the combustion process. According to the research findings on the extent of the influence of each of the mechanisms within individual periods.

УДК 621.436.13:621.57

DOI: 10.20998/0419-8719.2016.1.02

*Р. Н. Радченко, Н. С. Богданов*

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕПЛОТЫ В ТРЕХСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА СУДОВОГО МАЛОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

*Проанализирована эффективность трансформации теплоты в трехступенчатой системе охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля. Трехступенчатый охладитель наддувочного воздуха такой системы включает последовательно расположенные в воздушном тракте высокотемпературную ступень отвода высокопотенциальной теплоты от наддувочного воздуха после турбокомпрессора на нагрев промежуточного теплоносителя, служащего источником теплоты для теплоиспользующей холодильной машины, ступень охлаждения наддувочного воздуха забортной водой и низкотемпературную ступень глубокого охлаждения наддувочного воздуха, использующую холод, генерируемый теплоиспользующей холодильной машиной.*

#### Анализ проблемы и постановка цели исследования

На судах морского флота в качестве главных двигателей применяются в основном малооборотные дизели (МОД). Их термодинамическая эффективность зависит в значительной степени от температуры наддувочного воздуха: с ее повышением эффективный КПД МОД снижается, а удельный расход топлива  $b_e$ , соответственно, возрастает [1–3].

В судовых МОД все более широкое распространение находят двухступенчатые системы охлаждения наддувочного воздуха с использованием теплоты, отводимой в высокотемпературной ступени охладителя наддувочного воздуха (ОНВ<sub>ВТ</sub>), для нагрева воды на нужды судовой энергетической установки, например, нагрева питательной воды утилизационного пароводяного котла (УК) до температуры примерно 90 °С, нагрева топлива, масла, на другие теплофикационные цели.

Однако, опыт эксплуатации МОД транспортных судов показывает, что при нагрузках главного двигателя свыше 50 % генерируемая теплота превышает потребности судовых потребителей, а при нагрузках главного двигателя 85...90 % и температуре наружного воздуха около 0 °С это превышение составляет 50...100 %, что резко снижает эф-

фективность утилизации теплоты [3]. В то же время повышенные температуры забортной воды в системе охлаждения наддувочного воздуха приводят к падению эффективных КПД и мощности, возрастанию удельного расхода топлива  $b_e$ , что весьма остро ставит проблему охлаждения наддувочного воздуха. Одним из направлений ее решения является применение теплоиспользующих холодильных машин (ТХМ), утилизирующих теплоту наддувочного воздуха, выпускных газов и других источников сбросной теплоты МОД [4–6].

**Цель работы** – анализ эффективности трансформации теплоты в трехступенчатой системе охлаждения наддувочного воздуха судового МОД.

#### Изложения основного материала

Наиболее простой и надежной в эксплуатации из теплоиспользующих холодильных машин является эжекторная холодильная машина (ЭХМ). Использование в ЭХМ низкокипящего рабочего тела (НРТ)-хладагента обеспечивает глубокое охлаждение воздуха без поддержания вакуума в испарителе НРТ-охладителе воды (И-ОВ) промежуточного водяного контура охлаждения наддувочного воздуха.

На рис. 1 приведена схема трехступенчатой системы охлаждения наддувочного воздуха на базе ЭХМ, использующей теплоту наддувочного воздуха. Теплоиспользующая система охлаждения (ТСО)