

**Лєвтеров Антон Михайлович** – канд. техн. наук, с.н.с., доц., старший науковий співробітник відділу термогазодинаміки енергетичних машин Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, Україна, e-mail: Antmix1947@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5308-1375>.

**Авраменко Андрій Миколайович** – доктор техн. наук, с.н.с., провідний науковий співробітник відділу термогазодинаміки енергетичних машин Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, Україна, e-mail: An0100@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8130-1881>.

## SELECTION OF GAS MIXER PARAMETERS FOR DIESEL CONVERSION GENERATOR MOTOR IN GAS DIESEL

*A.M. Levterov, A.M. Avramenko*

According to literary sources, options for converting diesel engines into dual-fuel engines for operation on any fuel, in particular, natural gas (NG), were analyzed. The conversion method with external mixture formation and an ignition dose of liquid fuel involves the preparation of a gas-air mixture of the required composition in a special device. The methodology for choosing the design parameters of the gas mixer for the organization of the work process of a V-shaped diesel engine type 12Ch 15/17.5, converted into a gas diesel, which works as part of a motor-generator unit of backup power supply, is given. The basic design of the diesel motor-generator was analyzed. A comparative calculation of the working processes of diesel and gas-diesel variants of execution (with an ignition dose of diesel fuel of 10%) was carried out. The requirements for the design and location of the gas mixer have been formed. In the work, using 3D modeling technologies, the geometry of the gas mixer and its flow part were formed. Using the method of finite volumes, the calculation grid was synthesized and its adaptation near solid walls was carried out. Next, a series of numerical experiments was conducted in a three-dimensional setting to evaluate the throughput and quality of mixing network methane with air (when the robot is operating at typical operating modes). The distribution of flow velocities in the vertical and horizontal planes of the flow part of the gas mixer was evaluated, the change in pressure along the height of the gas mixer and the distribution of the mass fraction of methane in the flow part of the engine intake tract were analyzed, and scientific and practical recommendations were developed to ensure the efficient operation of gas diesel as part of a motor-generator installation. It is shown that the proposed design of the gas mixer allows effective mixing of methane with air when operating in the entire power range of the considered engine. The use of 3D modeling technologies, with the use of modern numerical methods, allows you to assess the operating conditions of the mixture by macro indicators and in local sub-regions, which allows, in the future, to develop recommendations for increasing the efficiency of the process of preparing the fuel-air mixture.

**Key words:** work process; motor-generator; natural gas; gas mixer; numerical simulation.

УДК 621.436.2

DOI: 10.20998/0419-8719.2024.2.03

*А.В. Савченко, М.С. Шелестов*

## КОМБІНОВАНА СИСТЕМА НАДДУВУ ВІТЧИЗНЯНОГО ВИСОКОФОРСОВАНОГО ДВОТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Сучасні тенденції в двигунобудуванні нерозривно пов'язані з удосконаленням силових агрегатів шляхом модернізації існуючих зразків. Впровадження форсованого до 1100 кВт дизеля типу ДН дозволяє підвищити ефективність та привести техніку у відповідність сучасним вимогам за короткий час і з меншими витратами. Ключовим методом удосконалення є модернізація системи наддуву, яка підвищує потужність без збільшення габаритів та маси двигуна, а також покращує техніко-економічні характеристики. Запропоновано комбіновану систему наддуву з турбокомпресором низького тиску (КНТ) та привідним компресором високого тиску (КВТ), які працюють спільно або окремо в залежності від режиму роботи. Використання математичної моделі робочого процесу дозволило провести розрахунково-експериментальне дослідження запропонованої системи на режимах максимальної потужності та максимального крутного моменту, підтверджуючи її високу ефективність. Застосування сучасних технологій та матеріалів, а також впровадження інноваційних методів проектування і моделювання дозволяє створювати більш надійні та довговічні силові агрегати. Модернізація системи наддуву є одним з найважливіших напрямків у розвитку сучасного двигунобудування, який дає змогу досягти підвищення рівня питомої потужності, покращення паливної економічності та екологічних характеристик двигунів шляхом забезпечення оптимальних умов їх функціонування в різних умовах експлуатації та в широкому діапазоні режимів роботи. В роботі наведено результати дослідження запропонованої схеми двоступеневого наддуву дизеля типу ДН, що дає змогу досягти потужності 1100 кВт. Показано, що дана схема має переваги над традиційною, оскільки дає змогу забезпечити більш високий тиск наддуву в більш широкому діапазоні частот обертання колінчастого валу, а також зменшити витрати потужності від колінчастого валу на привід компресору на режимах, що близькі до номінальних. Вказані вище фактори в сукупності обумовлюють суттєве покращення характеристик дизеля в цілому завдяки впровадженню системи двоступеневого наддуву.

**Ключові слова:** двотактний дизель; робочий процес; моделювання; багатоступеневий наддув; привідний компресор, турбокомпресор.

## Вступ

Світові тенденції вказують на те, що розвиток двигунобудування суттєво пов'язаний із подальшою модернізацією дизелів спеціального призначення. При вирішенні цієї задачі основну увагу приділяють удосконаленню раніше випущених силових агрегатів, які вже експлуатуються або виробляються. Модернізація сучасної вітчизняної спецтехніки, зокрема шляхом використання дизеля типу ДН, форсованого до 1100 кВт, дозволяє в короткі терміни і з меншими витратами досягти підвищення ефективності та відповідності сучасним стандартам. Цей підхід вважається найбільш раціональним, оскільки модернізація є постійним процесом науково-технічних, конструктивних і технологічних заходів, що спрямований на підвищення ключових властивостей спецтехніки і продовження її життєвого циклу. Існує ряд методів для досягнення цієї мети, проте більшість з них призводять до необхідності збільшення габаритних розмірів та маси двигуна. Модернізація системи наддуву є ефективним способом збільшення потужності без збільшення габаритів і поліпшення техніко-економічних характеристик двигуна.

**Метою роботи** є вибір та обґрунтування раціональної схеми та параметрів системи повітропостачання високофорсованого двотактного дизеля для підвищення показників питомої потужності енергетичної уставки.

## Особливості конструкції сучасних ДСН

Багатоступінчаті системи наддуву розширюють можливості регулювання потужності. Це сприяє поліпшенню подачі повітря в циліндри і зменшенню витрати палива як на стаціонарних, так і на перехідних режимах роботи двигуна. [1].

При підвищенні тиску наддуву існує обмеження на те, як високо можна підняти цей тиск за допомогою одного компресора через зниження ефективності і обмеження робочого діапазону витрати повітря. Зі зростанням тиску наддуву також збільшується температура робочого середовища на виході з компресора, що вимагає використання більш дорогих матеріалів для колеса компресора [2]. Зважаючи на наведене вище, при значному підвищенні тиску наддуву, багатоступінчатий наддув стає більш доцільним і економічно обґрунтованим варіантом, оскільки для його реалізації можна використовувати існуючі турбокомпресори.

Розглянемо особливості двоступеневих систем наддуву (ДСН) основних виробників.

Конструкції двигунів MTU 1163-04 відомі зі збільшеним тиском наддуву з 0,46 до 0,57 МПа і зниженням питомої витрати палива на 8% [4]. На принциповій схемі наддуву 16-циліндрового двигуна, показаній на рисунку 1, висвітлено дві групи

турбонаддуву. Кожна група містить один турбокомпресор низького тиску і один високого тиску, а також охолоджувачі наддувного повітря. Система наддуву складається з чотирьох таких груп, кожна з яких призначена для відповідного діапазону роботи.

Описана вище система наддуву забезпечує збільшення крутного моменту в широкому діапазоні швидкісних режимів роботи двигуна, в тому числі при низькій частоті обертання колінчастого валу. В першій зоні роботи двигуна весь потік відпрацьованих газів проходить через одну турбо-групу. Послідовне включення інших груп здійснюється залежно від навантаження і обертової частоти. У четвертій зоні працюють всі чотири групи турбонаддуву. В першій зоні через низькі витрати газів стиснення відбувається головним чином за допомогою турбокомпресора високого тиску (ВТ), тоді як турбокомпресор низького тиску (НТ) працює в режимі холостого ходу. При збільшенні витрат відпрацьованих газів ступінь низького тиску поступово включається в роботу, що забезпечує зростання тиску наддуву. Попереднє стиснення в компресорі НТ дозволяє компресору ВТ працювати при великих масових витратах повітря. Використання компактних турбокомпресорів на низьких обертах є ключовим для отримання високого тиску наддуву на низьких частотах обертання. Для зміни характеристик двигуна застосовується різноманітна схема підключення груп турбокомпресорів. Для ефективної роботи такої системи наддуву необхідно мати компресори з широким діапазоном характеристик.

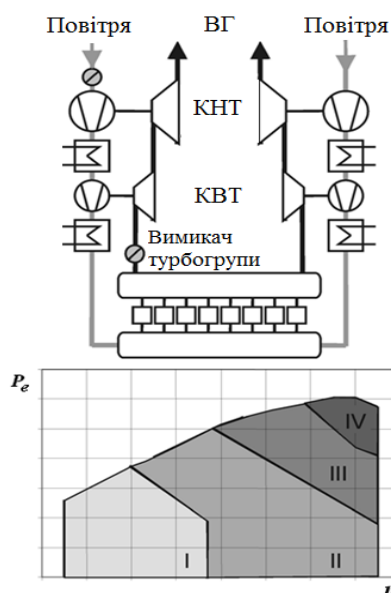


Рис. 1. Схема двоступеневої реєстрової системи наддуву фірми MTU

В рамках науково-дослідницького проекту HERCULES компанія MAN провела випробування двигуна 6L32/44CR з двоступеневою системою наддуву, системою управління закриттям впускного

клапана та регульованою турбіною високого тиску (рис. 2)

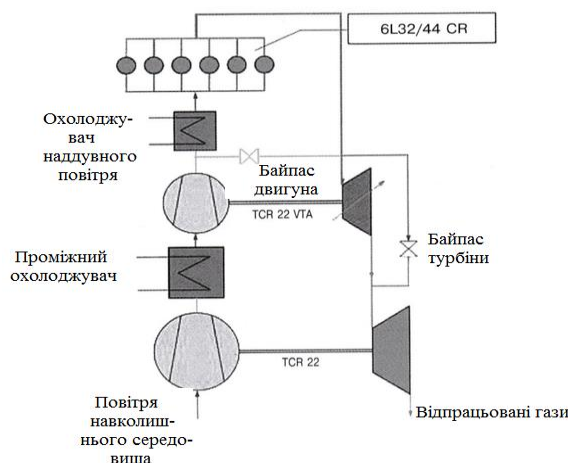


Рис. 2. Двоступенева система наддуву двигуна MAN 6L32/44CR з регульованою турбіною

В порівнянні з двигуном, що відповідав вимогам IMO Tier 1, впровадження описаних вище змін дало змогу зменшити викиди  $\text{NO}_x$  та димність ВГ дизеля більш ніж на 40% при одночасному збільшенні потужності з 560 до 640 кВт. Використання регульованої турбіни високого тиску значно покращило характеристики двигуна за рахунок підвищення тиску наддуву при часткових навантаженнях і забезпечило ефективні перехідні процеси. Крім того, встановлено, що підвищення ККД системи наддуву на 10% сприяє збільшенню ККД самого двигуна на 1%. Таким чином, використання багаторівневої системи наддуву може розглядатися як ефективний захід з оптимізації термодинамічного циклу двигуна.

Інша перспективна схема наддуву продемонстрована на рис. 3. Схема системи R2S (regulated twostage), розроблена фахівцями компаній Borg Warner Turbo System (BWTS) і BMW.

Система R2S включає два ТКР фірми BWTS і два перепускні клапани. Регулювання системи здійснюється шляхом перепуску частини відпрацьованих газів та повітря. Застосування системи R2S замість ТКР з регульованим сопловим апаратом (РСА) дає змогу суттєво збільшити середній ефективний тиск двигуна на всіх ділянках зовнішньої швидкісної характеристики.

Турбокомпресор низького тиску (ТКР1) розраховується, зважаючи на необхідність забезпечення номінальної потужності дизеля. Турбокомпресор високого тиску (ТКР2) розраховується, зважаючи на необхідність забезпечення високого крутного моменту в області низьких частот обертання колінчастого валу до рівня, що відповідає максимальному крутному моменту. Описані вище заходи дають

змогу зменшити затримку збільшення потужності двигуна при різкому збільшенні подачі палива.

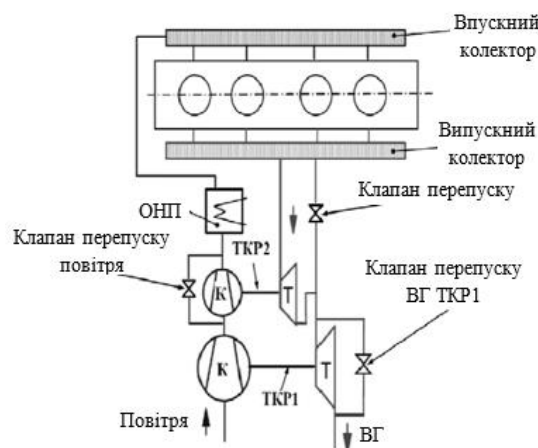


Рис. 3. Схема системи двоступінчастого турбонаддуву R2S для дизеля OM651 ( $z_{Vh}=2,2$  л; Евро 5)

Зовнішні швидкісні характеристики дизелів з різними схемами систем наддуву наведені на рисунку 4. З графіку видно, що двоступеневі системи наддуву дають змогу досягти суттєво більш високий рівень тиску наддуву в широкому діапазоні швидкісних режимів роботи дизеля.

#### Модернізація системи повітропостачання вітчизняного двотактного двигуна спеціального призначення типу ДН

У двотактних двигунах особливості робочого процесу при низьких обертах колінчастого валу ускладнюють подачу достатньої кількості свіжого заряду до циліндрів двигуна, що негативно впливає на його ефективність. Це особливо критично під час пуску двигуна і його роботи при малих навантаженнях.

Відповідно до результатів досліджень [2,3], вирішення цих проблем можливе завдяки впровадженню комбінованих систем наддуву. Такі системи мають кілька варіантів виконання. Наприклад, один з підходів передбачає механічний зв'язок турбокомпресора з колінчастим валом за допомогою муфт, що дозволяють від'єднувати вал турбокомпресора від колінчастого валу у випадках, коли потужності турбіни достатньо для приведення в дію компресора. Це знижує витрати потужності на привід агрегатів наддуву, що в свою чергу сприяє підвищенню ККД двигуна.

Сучасний підхід до форсування двигунів шляхом збільшення тиску наддуву передбачає обов'язкове використання проміжного охолоджувача наддувального повітря, що дає змогу зменшити витрати потужності на отримання необхідної кількості повітря.

Застосування обох вказаних заходів в комплексі з раціональним вибором схеми системи двоступеневого наддуву дають змогу одночасно суттєво зменшити витрати потужності на привід компресору та забезпечити підвищення тиску наддуву в широкому діапазоні частоти обертання колінчастого валу. Також варто відзначити, що завдяки вказаним заходам може бути досягнуто зменшення питомої витрати палива та питомих викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами. Також до переваг двоступеневих систем наддуву варто віднести їх кращу пристосованість до перехідних режимах роботи.

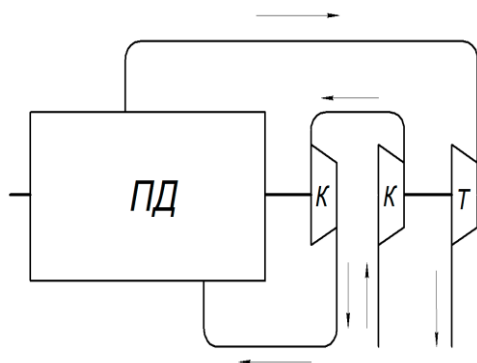


Рис. 4. Схема запропонованої системи наддуву

Для двотактного дизеля типу ДН розроблена і запропонована система повітропостачання за схемою (рисунок 4), що складається з турбокомпресора низького тиску (КНТ), привідного компресора високого тиску (КВТ), які можуть працювати окремо або разом в залежності від режиму роботи двигуна, а також двох охолоджувачів наддувального повітря [5, 9,

10]. Регулювання системи здійснюється шляхом зміни передаточного відношення приводу КВТ і контролю частини повітря, що проходить через компресор високого тиску [3, 8].

#### Результати математичного моделювання робочого процесу високофорсованого двотактного дизеля потужністю 1100 кВт з запропонованою системою наддуву

З метою дослідження системи двоступеневого наддуву, була розроблена математична модель дизеля [6-8, 10]. З використанням розробленої математичної моделі двигуна виконано розрахунково-експериментальне дослідження застосування запропонованої системи двоступеневого наддуву на режимах максимальної потужності та максимального крутного моменту.

Індикаторні діаграми базового та форсованого дизеля типу ДН наведені на рисунку 5. З індикаторних діаграм видно, що на режимі максимальної потужності у форсованому дизелі ДН збільшується максимальний тиск циклу, що пояснюється збільшенням кількості свіжого заряду в циліндрі. Варто відзначити, що на режимі максимального крутного моменту кут випередження початку впорскування палива було зменшено до 10 градусів п.к.в. до ВМТ (у базовому дизелі цей кут становив 18 градусів п.к.в. до ВМТ) з метою обмеження максимального тиску циклу до 19 МПа.

Інтегральні характеристики тепловиділення в циліндрах базового та форсованого дизеля наведені на рисунку 6. Диференційні характеристики тепловиділення в циліндрах базового та форсованого дизеля наведені на рисунку 7.

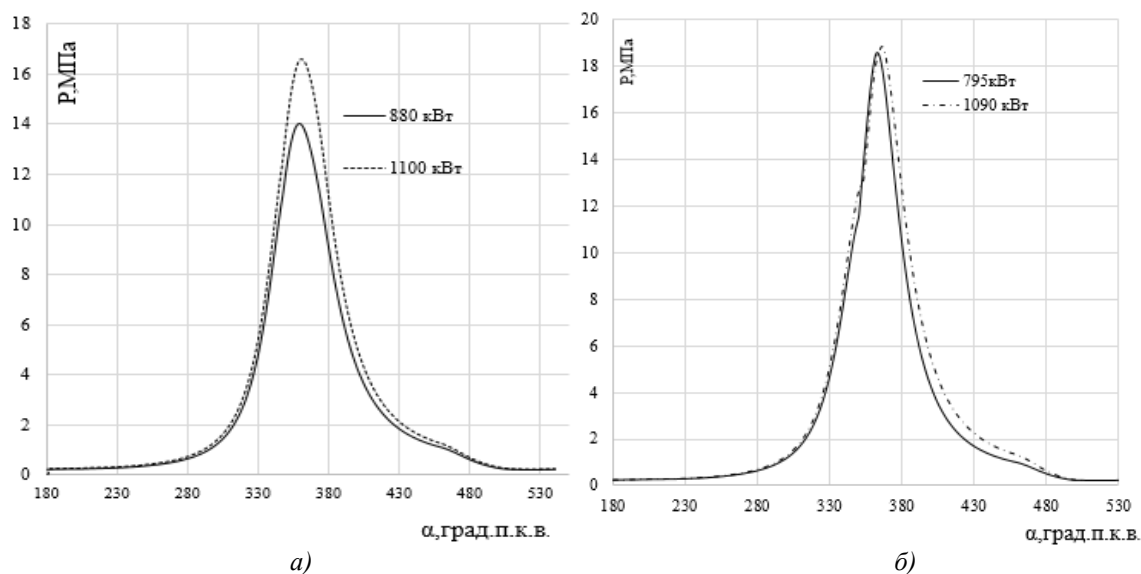


Рис. 5. Індикаторна діаграма базового та форсованого двотактного двигуна 6ДН12/2-12 на режимах максимальної потужності (а) та максимального крутного моменту (б)

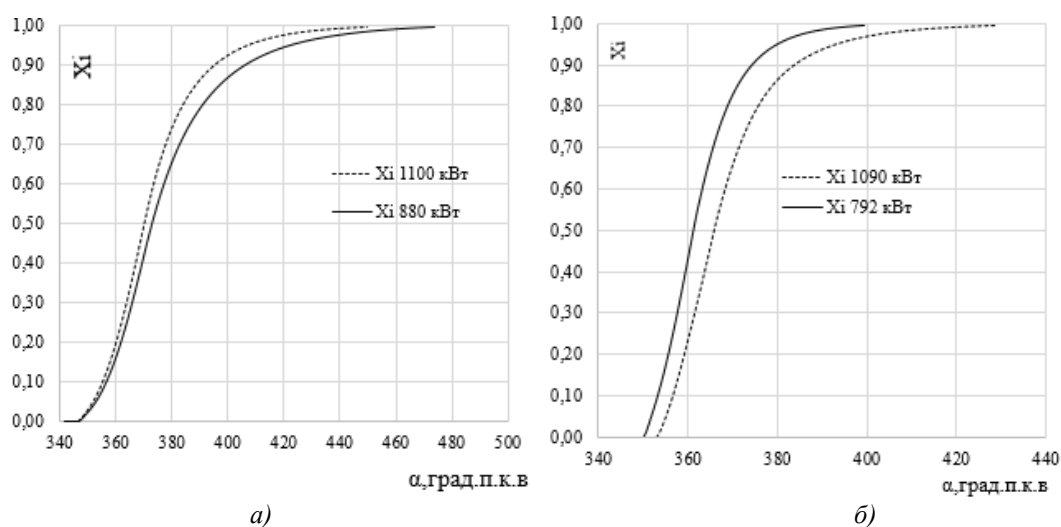


Рис. 6. Інтегральні ( $x$ ) характеристики тепловиділення в циліндрі базового та форсованого двигуна 6ДН12/2-12 на режимах максимальної потужності (а) та максимального крутного моменту (б)

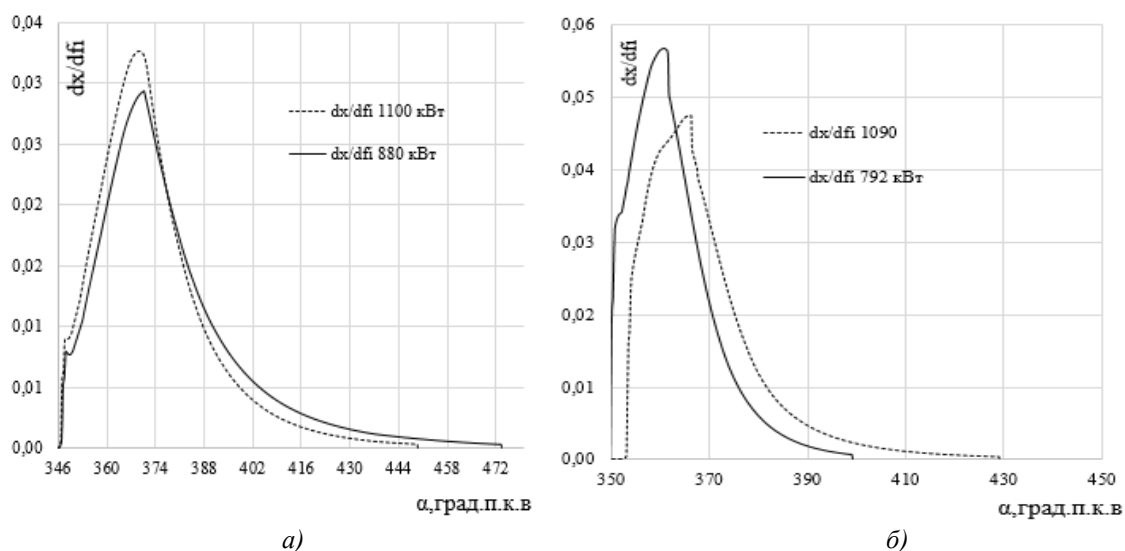


Рис. 7. Диференційні характеристики тепловиділення ( $dx/dfi$ ) в циліндрі базового та форсованого двигуна ДН на режимах максимальної потужності (а) та максимального крутного моменту (б)

Аналіз характеристик тепловиділення свідчить про збільшення швидкості процесу згоряння протягом фази спалахування та дифузійного згоряння в форсованому дизелі на режимі номінальної потужності. Це можна пояснити інтенсифікацією вихору всередині камери згоряння форсованого дизеля в порівнянні з базовим.

На графіках тепловиділення, які відповідають режиму максимального крутного моменту, видно, що початок процесу згоряння в форсованому дизелі відбувається пізніше, ніж в базовому дизелі. Це пояснюється вказаним вище зменшенням кута випередження початку впорскування палива на 8 градусів п.к.в. до ВМТ. Проте, з графіку видно, що початок процесу згоряння в форсованому дизелі відбувається лише на 4 градуси п.к.в. пізніше в порівнянні з базовим дизелем. Це свідчить про скорочення періоду затримки спалахування палива в форсованому

дизелі внаслідок значного збільшення тиску та температури в циліндрі в момент початку процесу впорскування. Вказане вище збільшення тиску та температури, насамперед, обумовлене двома факторами: збільшенням маси свіжого заряду циліндру та наближенням моменту початку впорскування до ВМТ.

Варто відзначити, що на графіку диференційного тепловиділення форсованого дизеля на режимі максимального крутного моменту візуально практично неможливо визначити максимум, що відповідає періоду спалаху палива. Це пояснюється скороченням періоду затримки спалахування палива, що в свою чергу обумовлює зменшення долі циклової подачі палива, яка встигає надійти до циліндру до моменту спалаху. Описане вище дає змогу зменшити максимальну швидкість наростання тиску, а отже – зменшити жорсткість робочого процесу дизеля, що сприятиме зменшенню рівня шуму та вібрації.

Питома ефективна витрата палива форсованого дизеля на режимі максимального крутного моменту практично не змінюється в порівнянні з базовим дизелем.

Питома ефективна витрата палива форсованого дизеля на режимі максимальної потужності зменшується на 5,6 %. Це пояснюється зменшенням потужності від колінчастого валу на привід компресора (у форсованому дизелі на режимі максимальної потужності всю роботу по стисненню повітря виконує виключно турбокомпресор).

### Висновки

Сучасні світові тенденції розвитку двигунобудування свідчать про зростання інтересу до підвищення потужності існуючих двигунів шляхом модернізації, без значних конструктивних змін і збільшення масо-габаритних характеристик. Ця задача є актуальною, оскільки дає змогу досягти покращення ефективності та питомої потужності енергетичних установок, що в свою чергу дасть змогу привести їх до відповідності сучасним технічним вимогам. Одним з ключових напрямків є модернізація системи повітропостачання, яка дає змогу ефективно підвищувати питому потужність двигунів при збереженні їх габаритних розмірів та одночасному покращенні економічних показників.

В двотактних двигунах при низькій частоті обертання колінчастого валу суттєво знижується ефективність наповнення циліндрів свіжим зарядом. В найбільшому ступені ця проблема характерна для двигунів з газотурбінним наддувом. Описане вище зниження ефективності наповнення циліндрів свіжим зарядом негативно впливає на процеси сумішотворення та згоряння палива. В роботі розглянуто найбільш поширені рішення цієї проблеми: комбіновані системи наддуву, що включають механічний зв'язок турбокомпресора з колінчастим валом. Такі рішення сприяють зниженню витрати потужності від колінчастого валу на привід компресору, що в свою чергу дає змогу підвищити ККД двигуна в цілому.

Для вітчизняного двотактного дизеля ДН, з метою форсування до потужності 1100 кВт, розроблено комбіновану систему наддуву, що включає турбокомпресор низького тиску (КНТ) та привідний компресор високого тиску (КВТ). Дана система забезпечує подачу необхідного об'єму повітря в циліндри на всіх режимах роботи двигуна і дає змогу вирішувати проблеми з пуском та роботою при невеликих навантаженнях і частотах обертання колінчастого валу. Дослідження цієї системи з використанням математичної моделі робочого процесу підтвердило її ефективність на режимах максимальної потужності та максимального крутного моменту.

### Список літератури:

1. Грэм Белл, Увеличение мощности двигателя посредством наддува / Грэм Белл – Київ: Авто клуб, 2013.-241 с.
2. Алёхин С.А. Перспективы дальнейшего улучшения удельных массогабаритных и мощностных показателей специальных двигателей типа 6ДН 12/2х12 / С.А. Алёхин // Двигатели внутреннего сгорания. – 2005. – № 1. – С. 3-7.3. Wintruff I. The next generation of MTU series 4000 rail engines to comply with EUIII emission legislation / I. Wintruff, O. Buecheler, S. Huchler // CIMAC Congress 2010, Bergen.
4. Turbocharger for internal combustion engines: пат. 4,769,993 Сполучені Штати Америки (США): F02В39/10 / Н. Kawamura, Isuzu Motors Limited. - № 139,099 /; заявл. 24.12.1987; опубл. 13.09.1988.
5. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Т.1. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. / За редакцією проф. А.П. Марченка, проф. А.Ф. Шеховцова – Харків: Видавн. центр НТУ «ХПІ», 2004. – 491 с. 6. Парсаданов І.В. Концепція організації процесу згоряння в опозитному двотактному дизелі при високому рівні форсування / І.В. Парсаданов, А.Г. Лал // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. – № 1. – С. 45-51.
7. Кравченко С.С. Математичне моделювання робочого процесу двотактного двигуна з зустрічно рухомими поршнями / С.С. Кравченко, О.Ю. Ліньков, М.С. Шелестов, О.М. Бекарюк, Е. Божко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків, 2021. № 4. С. 22-28. DOI: 10.20998/2078-774X.2021.04.03.
8. Савченко А.В. Дослідження високоефективного охолоджувача наддувального повітря / А.В. Савченко, М.С. Шелестов // Двигуни внутрішнього згоряння. Харків, 2022. № 2. С. 33-40.
9. Muspratt, A., Steel Hexagon: The evolution of armoured vehicle requirements, [Електронний ресурс]: <https://www.defenceiq.com/armoured-vehicles/whitepapers/steel-hexagon-the-evolution-of-armoured-vehicle-requirements>. 10. Кравченко С.С. Узгодження роботи компресорів двоступеневої системи наддуву високофорсованого дизеля / С.С. Кравченко, М.С. Шелестов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2020 (м. Харків, 28-30 жовтня 2020 р.). – Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2020. – С. 142.

### Bibliography (transliterated):

1. Graham, Bell. (2013), Increasing engine power by boost [Uvelicheniye moshchnosti dvigatelya posredstvom nadduva ], Kiev: Auto Club, 241 p.2. Alyohin, S.A. (2005), "Prospects for further improvement of specific weight, barometric and power indicators of special engines of the 6DN 12/2x12 type", Internal combustion engines ["Perspektivy dal'nejshego uluchsheniya udel'nykh massogabaritnykh i moshchnostnykh pokazatelej special'nykh dvigatelej tipa 6DN 12/2kh12", Dvigateli vnutrennego sgoraniya], №1, pp. 3-7. 3. Wintruff, I., Buecheler, O., Huchler S. (2010) "The Next Generation of MTU 4000 Series Rail Motors Must Meet EU III Emissions Regulations" 26th CIMAC Congress in Bergen, June 14-17, 2010, in Grigallen.4. Kawamura, H., (1988) Turbocharger for internal combustion engines. Isuzu Motors Limited, № 139,099. 5. Marchenko A.P., Shekhovtsova, A.F., (2004) A series of textbooks in 6 volumes. T.1. Development of structures of forced engines of ground transport vehicles [Seriya pidruchnykiv u 6 tomakh. T.1. Rozrobka konstruktivnykh vyhovnykh nazemnykh transportnykh mashyn] Marchenko A.P., Shekhovtsova. A.F. (Ed.), NTU "KHPI", Kharkiv, 491 p. 6. Parsadanov, I. V., La, I A. G. (2021), The concept of the

organization of the combustion process in an opposed two-stroke diesel engine at a high level of forcing [Konceptsiya orhanizatsiyi protsesu z-horyannya v opozytomomu dvotaktnomu dyzeli pry vysokomu rivni forsovannya], Kharkiv: Internal combustion engines, 45-51 p. 7. Kravchenko, S.S., Linkov, O.Yu., Shelestov, M.S., Bekaryuk, O.M., Bozhko, E. (2021), *Mathematical modeling of the working process of a two-stroke engine with counter-moving pistons [Matematychni modelyuvannya robochoho protsesu dvotaktnoho dyzhuna z zustrichno rukhomymy porshnyamy]*, Kharkiv: Bulletin of the National Technical University, 22-28 p. 8. Savchenko, A.V., Shelestov, M.S. (2022), *A study of a highly efficient supercharged air*

cooler [Doslidzhennya vysokoefektyvnoho okholodzhuvacha nadduvnoho povitrya], Kharkiv: Internal combustion engines, 33-40 p. 9. Muspratt, A., "Steel Hexagon: The evolution of armoured vehicle requirements", available at: <https://www.defenceiq.com/armouredvehicles/whitepapers/steel-hexagon-the-evolution-of-armouredvehicle-requirements>. 10. Kravchenko, S.S., Shelestov, M.C. (2020), *Coordinating the operation of the compressors of the two-stage supercharging system of a highly pressurized diesel engine [Uzhodzhennya roboty kompresoriv dvostupenevoyi systemy nadduvu vysokoforsovnoho dyzelya]*, Kharkiv: MicroCAD, 142 p.

Надійшла до редакції 19.06.2024 р.

**Савченко Анатолій Вікторович** – канд. техн. наук, старший викладач кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Savchenko.sci@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2328-9065>.

**Шелестов Максим Сергійович** – Ph.D., молодший науковий співробітник кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: maks.shelestov@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9003-1422>.

### COMBINED SUPERCHARGING SYSTEM OF DOMESTIC HIGH-PRESSURE TWO-STROKE SPECIAL PURPOSE DIESEL

*A. Savchenko, M. Shelestov*

Modern trends in engine construction are inextricably linked to the improvement of power units by modernizing existing models. The introduction of a forced to 1100 kW diesel engine of the DN type allows to increase the efficiency and bring the equipment in line with modern requirements in a short time and with lower costs. The key method of improvement is the modernization of the supercharging system, which increases power without increasing the dimensions and weight of the engine, as well as improves technical and economic characteristics. A combined supercharging system with a low-pressure turbocharger (LPT) and a high-pressure drive compressor (HPT) is proposed, which work together or separately depending on the operating mode. The use of a mathematical model of the workflow made it possible to carry out a computational and experimental study of the proposed system in the modes of maximum power and maximum torque, confirming its high efficiency. The use of modern technologies and materials, as well as the introduction of innovative design and modeling methods, allows to create more reliable and durable power units. Modernization of the supercharging system is one of the most important directions in the development of modern engine construction, which allows to achieve an increase in the level of specific power, improvement of fuel economy and environmental characteristics of engines by ensuring optimal conditions for their operation in various operating conditions and in a wide range of operating modes. The paper presents the research results of the proposed two-stage supercharging scheme of the DN type diesel engine, which makes it possible to achieve a power of 1100 kW. It is shown that this scheme has advantages over the traditional one, as it makes it possible to provide a higher boost pressure in a wider range of crankshaft RPM, as well as to reduce power consumption from the crankshaft to drive the compressor at modes close to the nominal ones. These factors collectively lead to a significant improvement in the characteristics of the diesel due to the introduction of the two-stage supercharging system.

**Key words:** two-stroke diesel; work process; modeling; multi-stage supercharging; drive compressor; turbocharger.