

---

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Шелестов Максим Сергійович**

УДК 621.436

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ НАДДУВУ  
ПОВІТРЯ ВИСОКОФОРСОВАНОГО ДВОТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ  
СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

142 – Енергетичне машинобудування  
14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



М.С. Шелестов

Наукові керівники:  
Кравченко Сергій Сергійович  
кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Шелестов М.С.* Вибір та обґрунтування параметрів системи наддуву повітря високофорсованого двотактного дизеля спеціального призначення

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування. – Національний Технічний Університет „Харківський Політехнічний Інститут”, Харків, 2023.

*Об’єкт дослідження* є фізичні, фізико-хімічні, термодинамічні, процеси, що мають місце в дизелі та визначають енергетичні, економічні, динамічні показники енергетичної установки спеціального призначення.

*Предмет дослідження* є параметри та характеристики системи наддуву високофорсованого двотактного дизеля потужністю 1100 кВт.

В дисертаційній роботі вирішені науково-практичні задачі підвищення питомої потужності та поліпшення експлуатаційних характеристик двотактного дизеля спеціального призначення за рахунок оптимізації двоступеневої системи наддуву з вільним турбокомпресором, проміжним охолодженням наддувного повітря та гнучким керуванням тиском шляхом зміни передаткового відношення привідного компресора і регулювання турбокомпресору за допомогою модифікації соплового апарату турбіни для підтримки високої продуктивності двигуна на всіх режимах роботи та збільшення діапазону робочих частот обертання колінчастого валу.

Дослідження виконано на основі фундаментальних положень термодинамічних процесів в циліндрі дизеля, методів математичного моделювання робочого процесу дизеля, методів аналізу включаючи аналітичні та чисельні методи, з сучасними технологіями обробки інформації.

У *вступі* обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об’єкт, предмет та методи виконання дослідження, наведено відомості про наукову новизну, практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію, структуру та обсяг дисертації.

В *першому розділі* наводяться загальні відомості щодо параметрів системи наддуву повітря високофорсованого двотактного дизеля.

Розглянуто сучасний стан вітчизняного танкового двигунобудування, а також перспективи його розвитку. Показано, що школа вітчизняного танкового двигунобудування визнана в світі і має великий досвід успішного вирішення складних науково-технічних задач та побудови двигунів з видатними показниками та характеристиками.

Наведено результати порівняльного аналізу двигунів сімейства «ТД»/»ТДФ» з найкращими світовими зразками двигунів танкових енергетичних установок. За результатами аналізу показано, що вітчизняні двигуни сімейства «ТД»/»ТДФ» мають високі питомі показники та гарний потенціал для подальшого форсування, насамперед шляхом збільшення тиску наддуву. Наведено глибоке порівняння двотактних та чотиритактних дизелів при їх використанні в якості танкової енергетичної установки, наведено переваги та недоліки обох двигунів. Показано, що однією з переваг двотактного дизеля є зручне його компонування в моторно-трансмійному відділенні бронетехніки. В результаті цього можливо суттєво підвищити рівень ремонтпридатності техніки: так, наприклад, левову частку часу на заміну двигуна сімейства 5ТДФ складає час на зливання та заповнення рідин в системі.

За результатами порівняльного аналізу зроблено висновок про перспективність двигунів сімейства «ТДФ» до модернізації та форсування. Зважаючи на задачу підвищення потужності без збільшення габаритного розміру енергетичної установки, показано, що найбільш доцільним є форсування дизеля за рахунок збільшення тиску наддуву за допомогою багатоступінчастої системи наддуву з можливістю гнучкого регулювання.

У *другому розділі* наведено теоретичну базу вдосконалення багатоступінчастої системи наддуву дизеля з метою забезпечення найбільш ефективної її роботи в широкому діапазоні навантаження та частоти обертання колінчастого валу дизеля.

Обґрунтовано задачу розробки системи двоступеневого наддуву повітря для

забезпечення максимальної потужності дизеля 6ТДФ на рівні 1100 кВт. Показано наявність потенціалу для зменшення втрат енергії від колінчастого валу двигуна при збільшенні тиску наддуву в широкому діапазоні режимів роботи. Розглянуто можливість підвищення ефективності компресорів системи наддуву, насамперед за рахунок впровадження триярусного колеса компресора, а також покращення узгодження між собою компресора з приводом від колінчастого валу та турбокомпресора. Комплексний вплив вказаних вище факторів дасть змогу суттєво підвищити характеристики системи наддуву, і внаслідок цього – двигуна в цілому.

Наведено характеристики осьових та відцентрових компресорів системи наддуву, проаналізовано вплив використання компресорів обох типів на досліджуваному дизелі, особливо вплив на компоновання енергетичної установки, зважаючи на те, що саме до компоновання двигунів бронетанкової техніки висуваються найбільш жорсткі вимоги. Розглянуто зовнішню швидкісну характеристику дизеля, що проектується, при використанні різних схем системи наддуву, та алгоритмів її керування.

Запропоновано концепцію керування роботою системи наддуву з метою забезпечення тиску наддуву на заданому рівні в широкому діапазоні режимів роботи дизеля. Система наддуву складається з турбокомпресору низького тиску та привідного компресору високого тиску, які з'єднані послідовно та працюють окремо або разом в залежності від режиму роботи двигуна.

*Третій розділ* містить в собі детальну інформацію про математичну модель дизеля 6ТДФ. Наведено огляд існуючих математичних моделей робочого процесу швидкохідних двотактних дизелів, проаналізовано перспективи їх використання для дизеля, що досліджується.

Показано, що одним з найбільш важливих процесів для моделювання є процес згоряння палива. В роботі використана математична модель згоряння, яка описує диференційну характеристику швидкості згоряння двома кривими, що відповідають періодам першого спалаху і дифузійного згоряння. Математична модель процесу

згоряння інтегрована в термодинамічну модель замкнутого циклу робочого процесу двотактного дизеля 6ДН12/2·12. Математична модель ідентифікована з використанням даних експериментальних досліджень дизеля. В результаті ідентифікації математичної моделі, похибка розрахунків не перевищує 5 % в усьому діапазоні режимів роботи дизеля.

В *четвертому розділі* наведено дані про показники та характеристики дизеля з двоступеневою системою наддуву, що має здатність гнучкого регулювання за визначеним алгоритмом для забезпечення заданого рівня тиску наддуву при найменших втратах потужності від колінчастого валу на привід компресору високого тиску дизеля. Таким чином показана можливість реалізації концепції системи наддуву, що запропонована в роботі та яка дасть змогу досягти перспективного на сьогодні рівня форсування дизеля 6ТДФ на рівні 1100 кВт. Визначено розподіл ступеня підвищення тиску в компресорах високого та низького тиску для усіх режимів роботи дизеля, показано вплив такого розподілу на загальну ефективність системи наддуву, а отже і дизеля в цілому. Виконано оцінку впливу проміжного охолодження на якість процесу наповнення циліндрів, показано доцільність використання проміжних охолоджувачів наддувного повітря після компресорів кожної з ступенів наддуву. Проведено розрахункове дослідження ефективності проміжних охолоджувачів наддувного повітря в залежності від їх конфігурації. За результатами розрахунків показано, що для задоволення вимог компактності, необхідно конфігурувати проточну частину охолоджувачів таким чином, аби швидкість потоку повітря була достатньо високою, що дозволить в значній мірі інтенсифікувати процеси теплообміну, проте ціною збільшення гідравлічного опору проточної частини охолоджувачів. Показано, що охолодження повітря покращує умови роботи та підвищує ефективність роботи компресору другої ступені наддуву.

Отримані та наведені в розділі *результати* повністю підтверджують можливість досягнення форсування дизеля 6ТДФ завдяки впровадженню двоступеневої системи наддуву з можливістю гнучкого регулювання та узгодження роботи агрегатів наддуву

обох ступенів, концепція якої наведена в роботі.

В дисертації отримані наступні *наукові результати*:

1. Розроблена та обґрунтована схема двоступеневої системи наддуву з проміжним охолодженням наддувного повітря після компресору кожного ступеня для високофорсованого двотактного дизеля потужністю 1100 кВт. Регулювання тиску наддуву здійснюється за допомогою зміни передаткового відношення привідного компресора та керування турбокомпресором завдяки модифікації соплового апарату турбіни (соплове регулювання). Ця концепція спрямована на підтримку високої продуктивності двигуна на всіх режимах роботи, підвищення його адаптивності та полегшення процесу холодного запуску.

2. Розроблено математичну модель робочого процесу для аналізу впливу окремих факторів на функціонування базового двигуна 6ТД-2. Запропонована математична модель процесу згоряння інтегрована в термодинамічну модель замкнутого циклу робочого процесу двотактного двигуна 6ДН12/2·12. Проведені розрахункові дослідження робочого процесу для базового двигуна 6ТД-2 та для перспективного дизеля із двоступеневою системою наддуву на режимах максимальної потужності та максимального крутного моменту.

3. Розроблена математична модель процесу розподілу ступеня підвищення тиску між приводним компресором високого тиску та компресором вільного ТКР може використовуватись для визначення розподілу ступенів підвищення тиску в агрегатах двоступеневої системи наддуву високофорсованого дизеля яка включає термодинамічні залежності для розрахунку температури і тиску на кожному кроці роботи. В результаті розрахунку отримано параметри робочого тіла в кожній характерній точці системи.

4. Проведено розрахункове дослідження застосування вискоелективних охолоджувачів наддувного повітря для двоступеневої системи наддуву високофорсованого дизеля спеціального призначення, та їх вплив на робочий процес двигуна. Проведений комплексний аналіз результатів розрахунків дає змогу

визначити раціональні параметри охолоджувачів які відповідають вимогам компактності енергетичної установки.

Враховуючи можливості підвищення характеристик двигуна при його виробництві результати дисертаційних досліджень передані до впровадження ДП «Завод імені Малишева». Ці дані потенційно дають змогу забезпечити покращення характеристик та показників високофорсованого двотактного дизеля спеціального призначення, за рахунок оптимізації роботи агрегатів наддуву в складі двоступеневої системи наддуву з вільним турбокомпресором.

*Ключові слова:* двотактний дизель, двоступенева система наддуву, процес згоряння, зовнішня швидкісна характеристика, динамічні характеристики, компресор високого тиску.

#### *Список публікацій здобувача*

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:*

1. Шелестов М. С. Розвиток системи наддуву високофорсованих дизелів / М. С. Шелестов // *Двигуни внутрішнього згоряння*. Харків, 2020. № 2. С. 20-27. (Б)
2. Шелестов М. Математичне моделювання робочого процесу двотактного двигуна з зустрічно рухомими поршнями / С. Кравченко, О. Ліньков, М. Шелестов, О. Бекарюк, Е.Божко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків, 2021. № 4. С. 22-28.(Б)
3. Шелестов М. С. Застосування ексергетичного методу для оцінки досконалості процесів в системі наддуву дизельного двигуна / А. П. Марченко, С. С. Кравченко, О. М. Бекарюк, М. С. Шелестов // *Двигуни внутрішнього згоряння*. Харків, 2021. № 2. С. 24-30. (Б)

4. Шелестов М. С. Аналіз існуючих систем наддуву та перспективи застосування електричного приводу у агрегатах наддуву / М. С. Шелестов, А. Г Лал // *Двигуни внутрішнього згорання*. Харків, 2022. № 1. С. 21-26. (Б)

5. Шелестов М. С. Особливості розподілу палива в об'ємі камери згорання двотактного дизеля із зустрічним рухом поршнів / А. Г Лал // *Двигуни внутрішнього згорання*. Харків, 2022. № 2. С. 40-46. (Б)

6. Шелестов М. С. Дослідження високоефективного охолоджувача наддувного повітря / А. В. Савченко, М. С. Шелестов // *Двигуни внутрішнього згорання*. Харків, 2022. № 2. С. 33-40. (Б)

## ABSTRACT

*Shelestov M.S.* Selection and substantiation of the air charging system parameters of a high-performance two-stroke special-purpose diesel engine

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 142 - Power engineering. - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2023.

*The object of research* is physical, physico-chemical, thermodynamic, processes that take place in diesel and determine the energy, economic, dynamic indicators of a special purpose power plant.

*The subject of the study* is the parameters and characteristics of the supercharging system high-performance two-stroke diesel 1100 kW engine.

In the dissertation, the scientific and practical problems of increasing the specific power and improving the operational characteristics of a special-purpose two-stroke diesel engine were solved due to the optimization of the two-stage supercharging system with a free turbocharger, intermediate cooling of the supercharged air and flexible pressure control by changing the transmission ratio of the drive compressor and regulating the turbocharger by modifying the nozzle turbine apparatus to maintain high engine performance in all operating modes and increase the range of operating frequencies of crankshaft rotation.

The research is based on the fundamental principles of thermodynamic processes in a diesel cylinder, methods of mathematical modeling of diesel engine workflow, methods of analysis, including analytical and numerical methods, with modern information processing technologies.

*The introduction* substantiates the relevance of the research, formulates the purpose and tasks of the research, defines the object, subject and methods of conducting the research,

provides information about the scientific novelty, practical value of the obtained results, personal contribution of the recipient, approval, structure and scope of the dissertation.

*The first chapter* provides general information on the parameters of the air charging system of a high-performance two-stroke diesel engine.

The current state of domestic tank engine construction, as well as the prospects for its development, are considered. It is shown that the school of domestic tank engine construction is recognized in the world and has extensive experience in successfully solving complex scientific and technical problems and building engines with outstanding indicators and characteristics.

The results of a comparative analysis of engines of the "TD"/"TDF" family with the best world examples of engines of tank power plants are given. According to the results of the analysis, it is shown that the domestic engines of the "TD"/"TDF" family have high specific indicators and a good potential for further forcing, primarily by increasing the boost pressure. An in-depth comparison of two-stroke and four-stroke diesel engines when used as a tank power plant is given, the advantages and disadvantages of both engines are given. It is shown that one of the advantages of a two-stroke diesel engine is its convenient layout in the motor-transmission compartment of armored vehicles. As a result, it is possible to significantly increase the level of repairability of the equipment for example, the lion's share of the time for replacing the engine of the 5TDF family is the time for draining and filling fluids in the system.

Based on the results of the comparative analysis, a conclusion was made about the prospects of the engines of the "TDF" family for modernization and boosting. Taking into account the task of increasing power without increasing the overall size of the power plant, it is shown that it is most appropriate to boost the diesel by increasing the supercharging pressure using a multi-stage supercharging system with the possibility of flexible adjustment.

*The second chapter* provides the theoretical basis for improving the multi-stage diesel supercharging system in order to ensure its most efficient operation in a wide range of load and crankshaft rotation speed of the diesel engine.

The relevance of the task of developing a two-stage air supercharging system to ensure

the maximum power of the 6TDF diesel engine at the level of 1100 kW is substantiated. Within section, the presence of potential for reducing energy losses from the crankshaft of the engine when increasing the boost pressure in a wide range of operating modes is shown. The possibility of increasing the efficiency of supercharging system compressors was considered, primarily due to the introduction of a three-stage compressor wheel, as well as improving the coordination of the crankshaft-driven compressor and turbocharger. The complex influence of the above factors will make it possible to significantly improve the characteristics of the supercharging system, and as a result, the engine as a whole.

The characteristics of the axial and centrifugal compressors of the supercharging system are given, the impact of the use of both types of compressors on the studied diesel engine is analyzed, especially the impact on the layout of the power plant, taking into account the fact that the most stringent requirements are placed on the layout of the engines of armored vehicles. The external speed characteristic of the designed diesel engine, when using different schemes of the supercharging system and its control algorithms, is considered.

The concept of controlling the operation of the supercharging system is proposed in order to ensure the supercharging pressure at a given level in a wide range of diesel operating modes. The supercharging system consists of a low-pressure turbocharger and a high-pressure drive compressor, which are connected in series and operate separately or together depending on the engine's operating mode.

*The third chapter* contains detailed information about the mathematical model of the 6TDF diesel engine. An overview of the existing mathematical models of the working process of high-speed two-stroke diesel engines is given, and the prospects of their use for the diesel under study are analyzed.

It is shown that one of the most important processes for modeling is the process of fuel combustion. The work uses a mathematical model of combustion, which describes the differential characteristic of the combustion speed with two curves corresponding to the periods of the first flash and diffusion combustion. The mathematical model of the combustion process is integrated into the closed-cycle thermodynamic model of the two-stroke diesel

engine 6DN2\*12/12. The mathematical model is identified using the data of experimental studies of the diesel engine. As a result of the identification of the mathematical model, the calculation error does not exceed 5% in the entire range of diesel operation modes.

In *the fourth chapter* data on the indicators and characteristics of a diesel engine with a two-stage supercharging system, which has the ability to be flexibly adjusted according to a defined algorithm in order to ensure a given level of supercharging pressure with the smallest power losses from the crankshaft to the drive of the diesel's high-pressure compressor, are given. In this way, it is shown the possibility of implementing the supercharging system concept proposed in the work and which will make it possible to achieve today's promising level of 6TDF diesel forcing at the level of 1100 kW. The distribution of the degree of pressure increase in high- and low-pressure compressors for all modes of operation of the diesel engine is determined, and the influence of such distribution on the overall efficiency of the supercharging system, and therefore on the diesel as a whole, is shown. The impact of intermediate cooling on the quality of the cylinder filling process was evaluated, the necessity of using intermediate charge air coolers after the compressors of each of the supercharging stages was shown. A calculated study of the effectiveness of intercoolers of supercharged air depending on their configuration was carried out. According to the results of the calculations, it is shown that in order to meet the requirements of compactness, it is necessary to configure the flow part of the coolers in such a way that the air flow rate is high enough, which will allow to significantly intensify the heat exchange processes, but at the cost of increasing the hydraulic resistance of the flow part of the coolers. It is shown that air cooling improves the working conditions and increases the efficiency of the compressor of the second stage of supercharging.

*The results* obtained and presented in the section fully confirm the possibility of achieving 6TDF diesel boost due to the introduction of a two-stage supercharging system with the possibility of flexible regulation and coordination of the operation of the supercharging units of both stages, the concept of which is given in the work.

The following *scientific results* were obtained in the dissertation:

1. A scheme of a two-stage supercharging system with intermediate cooling was developed and substantiated of charge air after the compressor of each stage for a high-pressure two-stroke diesel with a capacity of 1100 kW. Boost pressure adjustment is carried out by changing the gear ratio of the drive compressor and controlling the turbocharger due to the modification of the turbine nozzle apparatus (nozzle adjustment). This concept is aimed at maintaining high engine performance in all operating modes, increasing its adaptability and facilitating the cold start process.

2. A mathematical model of the work process was developed to analyze the influence of individual factors on the functioning of the 6TD-2 base engine. The proposed mathematical model of the combustion process is integrated into the thermodynamic model of the closed cycle of the working process of the 6DN2\*12/12 two-stroke engine. Calculation studies of the work process were carried out for the basic 6TD-2 engine and for a promising diesel with a two-stage supercharging system at maximum power and maximum torque modes.

3. The developed mathematical model of the process of the distribution of the degree of pressure increase between the driven high-pressure compressor and the free TKR compressor can be used to determine the distribution of the degrees of pressure increase in the units of the two-stage supercharger system of a high-pressure diesel engine, which includes thermodynamic changes for calculating temperature and pressure at each step of work. As a result of the calculation, the parameters of the working body at the skin characteristic point of the system were obtained.

4. A calculation study of the use of highly efficient charge air coolers for a two-stage supercharging system was carried out of high-pressure diesel for special purposes, and their influence on the working process of the engine. The comprehensive analysis of the results of the calculations makes it possible to determine the rational parameters of the coolers that meet the compactness requirements of the power plant.

Taking into account the possibility of improving the characteristics of the engine during its production, the results of the dissertation research were transferred to the implementation of the Malyshev Plant. These data potentially make it possible to improve the characteristics and indicators of a highly boosted two-stroke special-purpose diesel engine by optimizing the operation of supercharging units as part of a two-stage supercharging system with a free turbocharger.

*Keywords* : two-stroke diesel, two-stage supercharging system , combustion process, external speed characteristics, dynamic characteristics, high-pressure compressor.

*List of publications of the acquirer*

*Scientific works in which the main scientific results were published:*

1. Shelestov M. S. Development of the supercharging system high-performance diesel / M. S. Shelestov // *Internal combustion engines*. Kharkiv, 2020. No. 2. P. 20-27. (B)
2. Shelestov M. Mathematical modeling of the working process of a two-stroke engine with counter-moving pistons / S. Kravchenko, O. Linkov, M. Shelestov, O. Bekaryuk, E. Bozhko // *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment*. Kharkiv, 2021. No. 4. P. 22-28. (B)
3. Shelestov M. S. The application of the exergetic method to assess the perfection of processes in the supercharging system of a diesel engine / A. P. Marchenko, S. S. Kravchenko, O. M. Bekaryuk, M. S. Shelestov // *Internal combustion engines*. Kharkiv, 2021. No. 2. P. 24-30. (B)
4. Shelestov M. S. Analysis of existing supercharging systems and prospects for the use of electric drives in supercharging units / M. S. Shelestov, A. G. Lal // *Internal combustion engines*. Kharkiv, 2022. No. 1. P. 21-26.(B)

5. Shelestov M. S. Peculiarities of fuel distribution in the volume of the combustion chamber of a two-stroke diesel engine with reciprocating piston movement / A. G. Lal , M. S. Shelestov // *Internal combustion engines*. Kharkiv, 2022. No. 2. P. 40-46. (B)

6. Shelestov M. S. Research of a highly efficient supercharged air cooler / A. V. Savchenko, M. S. Shelestov // *Internal combustion engines*. Kharkiv, 2022. No. 2. P. 33-40.(B)

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....	4
ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1.....	11
ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ СВІТОВИХ ТЕНДЕНЦІЙ ЗАСТОСУВАННЯ НАДДУВУ ДВИГУНІВ .....	11
1.1 Сучасний стан та перспективи розвитку вітчизняного танкового двигунобудування.....	11
1.2 Двигуни основних бойових танків країн-лідерів танкобудування .....	21
1.3 Перспективи розвитку вітчизняних танкових дизелів .....	30
1.4 Перспективи впровадження регульованого наддуву .....	37
1.5 Методи та пристрої для регулювання наддуву у високофорсованих дизелях..	43
1.6 Конструктивне виконання систем двоступеневого наддуву високофорсованих дизелів.....	48
Висновки до Розділу 1.....	60
РОЗДІЛ 2.....	62
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ПОВІТРОПОСТАЧАННЯ ПЕРСПЕКТИВНОЇ ТАНКОВОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ З ДИЗЕЛЕМ ФОРСОВАНОГО ДО 1100 КВТ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФОРМУВАННЯ ЗАДАНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ .....	62
2.1 Конструктивне виконання та особливості системи повітропостачання лінійки транспортних дизелів ДН12/2х12 .....	62
2.2 Особливості формування характеристик і основних параметрів при модернізації танкової енергетичної установки за рахунок високого форсування дизеля .....	72
2.3 Розробка системи двоступеневого наддуву з проміжним охолодженням наддувного повітря та системи регулювання турбіни і компресора дизеля 6ТД-2 .....	74
Висновки до Розділу 2.....	81
РОЗДІЛ 3.....	83

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВИГУНА СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ .....	83
3.1 Загальні диференціальні рівняння процесів масообміну і теплообміну в надпоршневій порожнині.....	83
3.2 Аналіз математичних моделей робочого процесу двигуна.....	87
Висновки до Розділу 3.....	98
РОЗДІЛ 4.....	99
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОХРАХУНКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАСТОСУВАННЯ ДВОСТУПЕНЕВОЇ СИСТЕМИ НАДДУВУ ВИСОКОФОРСОВАНОГО ДИЗЕЛЯ.....	99
4.1 Результати математичного моделювання робочого процесу високофорсованого двотактного дизеля потужністю 1100 кВт з запропонованою системою наддуву .....	99
4.2 Розподіл ступеня підвищення тиску між приводним компресором та компресором вільного ТКР.....	104
4.3 Дослідження застосування високоефективного охолоджувача наддувного повітря.....	112
4.3.1 Оцінка впливу охолоджувача наддувного повітря на робочий процес ....	112
4.3.2 Методика розрахункових досліджень .....	114
4.3.3 Характеристика системи охолодження наддувного повітря .....	120
Висновки до Розділу 4.....	125
ВИСНОВКИ .....	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	129
ДОДАТОК А.....	138
ДОДАТОК Б .....	152
ДОДАТОК В.....	159
ДОДАТОК Г .....	165
ДОДАТОК Д.....	167

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ТДФ – турбований дизель форсований;

ДСН – Двоступенева система наддуву;

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;

ТКР – турбокомпресор;

ЗШХ – зовнішня швидкісна характеристика;

ОСН –одноступінчаті системи наддува ;

КВТ -високого тиску ;

КНТ-низького тиску ;