

**OPTIMIZAREA PERFORMANȚEI  
MOTOARELOR CU ARDERE INTERNĂ  
PRIN RĂCIREA COMBINATĂ A  
TURBOSUFLANTELOR**

**Student:**

**Ceban Ivan**

**Conducător:**

**Banari Eduard  
Dr., în șt. ing.  
Lector universitar**

**Chișinău, 2026**

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII AL REPUBLICII  
MOLDOVA**

**Universitatea Tehnică a Moldovei  
Facultatea Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi  
Departamentul Transporturi**

**Admis la susținere  
Șef departament:  
Ceban Victor, conferențiar universitar, dr.**

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2026

**OPTIMIZAREA PERFORMANȚEI  
MOTOARELOR CU ARDERE INTERNĂ PRIN  
RĂCIREA COMBINATĂ A  
TURBOSUFLANTELOR**

**Teză de master**

**Student:**

**Ceban Ivan,  
grupa STAITA 241 M**

**Conducător:**

**Banari Eduard,  
lector universitar, dr.**

**Chișinău, 2026**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЙ  
РЕСПУБЛИКИ МОЛДОВА**

**Технический Университет Молдовы  
Факультет Инженерной Механики, Промышленности и Транспорта  
Департамент Транспорта**

Допущен к защите  
Зав. департамента:  
**Чебан Виктор, д.т.н., конф. унив.**

\_\_\_\_\_ 2026  
”\_\_\_\_\_”

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ  
ЗА СЧЁТ КОМБИНИРОВАННОГО  
ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ**

**Магистерская диссертация**

**Студент:**

**Чебан Иван,  
группа STAITA 241 M**

**Руководитель:**

**Банарь Эдуард,  
Д.т.н., препод. унив.**

**Кишинев, 2026**

## АННОТАЦИЯ

**Чебан Иван. „Оптимизация работы двигателей внутреннего сгорания за счёт комбинированного охлаждения турбокомпрессоров”.** Магистерская диссертация. ТУМ, Кишинев, 2026.

Структура магистерской диссертации включает введение, три главы, общие выводы и список использованной литературы. Объём работы составляет 89 страниц формата А4 и содержит 15 рисунков и 4 таблицы.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, турбокомпрессор, комбинированное охлаждение, наддув, тепловой расчёт.

**Целью данной работы** является анализ и обоснование эффективности применения комбинированного охлаждения турбокомпрессоров для повышения энергетических, экономических и эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания.

**Цель исследования** заключается в теоретическом обосновании и сравнительной оценке влияния комбинированного охлаждения турбокомпрессора на основные параметры рабочего цикла двигателя, такие как эффективная мощность, крутящий момент, удельный эффективный расход топлива, а также эффективный и механический коэффициенты полезного действия.

**Методы, примененные при проведении исследования:** В процессе исследования были использованы методы теоретического анализа и обобщения научно-технической литературы, расчётно-аналитические методы теплового расчёта двигателя внутреннего сгорания, методы сравнительного анализа параметров двигателя при использовании турбокомпрессоров с простым и комбинированным охлаждением, а также методы графического анализа и интерпретации полученных результатов.

**Полученные результаты:** В магистерской диссертации выполнено теоретическое исследование применения турбокомпрессора с комбинированным охлаждением и проведён тепловой расчёт дизельного двигателя Д4 102×118. Установлено, что использование комбинированного охлаждения приводит к увеличению эффективной мощности на 25-29 кВт и росту крутящего момента с 335 до 445,9 Н·м. Удельный эффективный расход топлива снизился почти на 40 г/кВт·ч, а механический КПД возрос на 3,4 %. Полученные результаты подтверждают, что турбокомпрессор с комбинированным охлаждением является эффективным и перспективным решением для повышения экономичности, мощности и надёжности двигателей внутреннего сгорания.

## ANNOTATION

**Cheban Ivan. "Optimization of internal combustion engine performance using combined turbocharger cooling."** Master's thesis. TUM, Chisinau, 2026.

**The master's thesis** consists of an introduction, three chapters, general conclusions, and a list of references. The work is 89 A4 pages long and contains 15 figures and 4 tables.

**Keywords:** internal combustion engine, turbocharger, combined cooling, supercharging, thermal analysis.

**The objective of this work** is to analyze and justify the effectiveness of combined turbocharger cooling to improve the energy, economic, and operational performance of internal combustion engines.

**The objective of the study** is to theoretically substantiate and compare the impact of combined turbocharger cooling on key engine operating cycle parameters, such as effective power, torque, specific fuel consumption, and effective and mechanical efficiencies.

**Methods applied in the study:** The study utilized theoretical analysis and literature review, computational and analytical methods for thermal design of internal combustion engines, comparative analysis of engine parameters using turbochargers with simple and combined cooling, and graphical analysis and interpretation of the results.

**Results:** This master's thesis presents a theoretical study of the use of a turbocharger with combined cooling and a thermal analysis of a D4 102×118 diesel engine.

Combined cooling was found to increase effective power by 25-29 kW and torque from 335 to 445.9 N m. Specific fuel consumption decreased by almost 40 g/kW h, and mechanical efficiency increased by 3.4%.

The obtained results confirm that a turbocharger with combined cooling is an effective and promising solution for increasing the efficiency, power and reliability of internal combustion engines.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>АННОТАЦИЯ</b> .....	<b>6</b>
<b>ANNOTATION</b> .....	<b>7</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>10</b>
<b>1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ И ИХ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ</b> .....	<b>12</b>
1.1 Исторические предпосылки появления турбокомпрессора .....	12
1.2 Проблема и пути решения увеличения мощности ДВС .....	14
1.2.1 Основная проблема двигателей конца XIX - начала XX века .....	15
1.3 Возникновение идеи турбокомпрессора .....	18
1.3.1 Изобретение и первые разработки турбокомпрессоров .....	19
1.4. Этапы развития турбокомпрессоров .....	20
1.4.1 Турбонаддув в дизельных двигателях середины XX века .....	20
1.4.2 Внедрение турбонаддува в автомобильную промышленность .....	22
1.4.3 Эволюция конструкционных материалов и технологий .....	23
1.4.4 Применение турбокомпрессоров в современных ДВС .....	24
1.5 Применение турбокомпрессоров в гибридных силовых установках .....	26
1.6 Электрические турбокомпрессоры как направление развития современных ДВС .....	28
1.7 Технические преимущества и недостатки турбонаддува .....	30
1.8 Выводы по первой главе .....	32
<b>2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОМБИНИРОВАННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ</b> .....	<b>33</b>
2.1 Общие сведения о системах охлаждения турбокомпрессоров .....	33
2.2 Воздушное охлаждение турбокомпрессоров .....	34
2.3 Масляное охлаждение турбокомпрессора .....	36
2.4 Жидкостное охлаждение турбокомпрессора .....	38
2.5 Охлаждение свежего заряда на впуске в двигателе внутреннего сгорания .....	39
2.5.1 Влияние охлаждения свежего воздуха на наполнение цилиндров и эффективность двигателя с наддувом .....	40
2.6 Охлаждение турбокомпрессора как фактор повышения давления наддува .....	41
2.7 Роль комбинированного охлаждения свежего воздуха в повышении надёжности турбины .....	46
2.8 Выводы по второй главе .....	47

<b>3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ В ДВС .....</b>	<b>48</b>
3.1 Общие сведения.....	48
3.2 Реальные циклы двигателя внутреннего сгорания.....	49
3.3 Определение параметров свежего рабочего тела.....	53
3.4 Определение параметров окружающей среды .....	53
3.5 Расчёт процесса впуска.....	56
3.6 Расчёт процесса сжатия .....	60
3.7 Расчёт процесса сгорания .....	63
3.8 Определение удельной теплоёмкость газов.....	65
3.9. Расчёт процесса расширения.....	68
3.10 Расчёт индикаторных параметров рабочего цикла двигателя .....	70
3.11. Расчет эффективных параметров рабочего цикла двигателя.....	74
3.12 Основные параметры для сравнительной оценки ДВС .....	83
3.13 Выводы по третьей главе .....	85
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>86</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>87</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие двигателестроения характеризуется стремлением к повышению энергетической эффективности, снижению расхода топлива и уменьшению экологического воздействия транспортных средств. В условиях глобального ужесточения экологических нормативов и роста требований к динамическим характеристикам двигателей внутреннего сгорания (ДВС) технология турбонаддува приобретает особое значение. Турбокомпрессоры, использующие энергию отработавших газов, позволяют значительно увеличивать удельную мощность двигателя, повышать топливную экономичность и обеспечивать более полный процесс сгорания топлива. Благодаря этим преимуществам турбонаддув стал ключевым элементом в современных бензиновых, дизельных и гибридных силовых установках.

Историческое развитие турбокомпрессоров связано с решением двух фундаментальных инженерных задач: увеличением мощности двигателя без роста его рабочего объёма и повышением эффективности использования энергии, выделяемой при сгорании топлива. От первых теоретических предпосылок конца XIX века до современных высокотехнологичных турбокомпрессоров прошёл длительный путь, включающий совершенствование конструкционных материалов, расширение сфер применения, развитие систем управления и внедрение новых методов охлаждения.

Несмотря на значительный прогресс в области конструкции и технологий турбокомпрессоров, одной из центральных инженерных проблем остаётся управление их тепловым режимом. Высокие температуры отработавших газов, значительные тепловые и механические нагрузки, а также инерционные процессы в рабочих зонах обуславливают необходимость оптимизации систем охлаждения. Эффективность охлаждения напрямую влияет на ресурс турбокомпрессора, стабильность его функционирования, безопасность эксплуатации и общий КПД силовой установки. В связи с этим изучение теплового режима турбокомпрессоров и анализ существующих методов охлаждения представляются актуальными как в научном, так и в практическом аспекте.

Кроме того, в последние годы наблюдается активное развитие электрических турбокомпрессоров и комбинированных систем наддува, что открывает новые возможности для снижения турбо-ямы, повышения динамических характеристик двигателя и увеличения эффективности наддува в переходных режимах. Эти современные тенденции требуют комплексного анализа исторических предпосылок, теоретических основ и инженерных решений, связанных с функционированием турбокомпрессоров.

Помимо инженерных и эксплуатационных аспектов, значительное внимание в современных исследованиях уделяется повышению надёжности и долговечности турбокомпрессоров. Условия их работы предполагают экстремальные температуры, высокие скорости вращения ротора и интенсивные механические нагрузки, что приводит к необходимости использования жаропрочных сплавов, керамических материалов и покрытий с особыми антифрикционными свойствами. Развитие материаловедения оказывает непосредственное влияние на повышение ресурса турбинных колес, подшипников скольжения и шарикоподшипников, а также элементов корпуса турбины, подверженных термическим деформациям.

Развитие гибридных и электрических силовых установок также расширяет роль турбонаддува. Электрические турбокомпрессоры способны обеспечивать мгновенное создание давления наддува, компенсируя инерционность классических механических систем и полностью устраняя турбо-дыру. Кроме того, они позволяют реализовать принципы рекуперации энергии выхлопных газов, что повышает общий энергетический баланс силовой установки.

В совокупности данные направления развития демонстрируют, что турбонаддув остаётся одним из наиболее перспективных инструментов повышения эффективности и экологичности двигателей внутреннего сгорания. Его дальнейшая эволюция будет тесно связана с внедрением новых материалов, совершенствованием аэродинамики, развитием систем управления и интеграцией с электрическими компонентами современных силовых агрегатов.

Магистерская диссертация направлена на систематизацию знаний о турбокомпрессорах, анализ их развития, принципов работы, теплового режима, существующих систем охлаждения и современных технологических решений. Работа охватывает как фундаментальные, так и прикладные аспекты функционирования турбонагнетателей, что позволяет сформировать целостное представление о роли турбонаддува в современном двигателестроении и определить перспективные направления дальнейшего совершенствования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АБРАМОВ, П. В., СИДОРОВ, М. А. *Повышение эффективности работы турбокомпрессоров автомобильных ДВС путём комбинированного охлаждения.* – М.: Машиностроение, 2020. - 212 с.
2. БАРСКИЙ, И. А., ШАТАЛОВ, И. К. Влияние охлаждения корпуса турбокомпрессора для наддува дизеля на его тепловой баланс. В: *Вестник РУДН, серия Инженерные исследования*, № 2 (9), 2004, стр. 50 - 54.
3. БАРСКИЙ, И. А. *Особенности выбора параметров турбины с сопловым регулированием.* - Двигателестроение, 2003, № 5, с. 14 -16.
4. ДИКИЙ, А. А., ВОЛЯК, П. С., БАНАРЬ, Э. П. Математическое моделирование энергетических и экономических параметров двигателя 4DC-125/110 работающего на различных видах топлива на основании теплового расчета. В: *Общегосударственный межведомственный научно-технический сборник. Конструирование, производство и эксплуатация сельскохозяйственных машин.* Вып. 49, с. 75-82, 2019, ISSN 2414-3820, г. Кропивницкий.
5. КИСЕЛЕВ, А. И., АЛЕКСЕЕВ, В. Д. *Современные методы охлаждения турбокомпрессоров транспортных двигателей.* - Казань: КГТУ, 2021. - 168 с.
6. ЛАКУСТА, И. Г., БЕШЛЯГЭ, И. И, БАНАРЬ, Э. П. Особенности теплового расчета дизельного двигателя, работающего на биотопливе. В: *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения.* Издательство: Брянский Государственный Аграрный Университет (Кокино) №: 1 (16), г. 2017, стр. 237-245, ISBN 5-88517-082-7.
7. ЛЕБЕДЕВ, К. Г. *Тепловые процессы в турбонаддуве двигателей внутреннего сгорания.* – СПб.: Профессия, 2019. - 287 с.
8. ПЕТРОВ, О. В. *Энергетическая эффективность ДВС и роль охлаждения в снижении тепловых нагрузок турбокомпрессора.* - Самара: СамГТУ, 2019. - 205 с.
9. ТРОФИМОВ, Р. А., МАКАРОВ, Н. С. *Инновационные системы охлаждения наддувочных агрегатов в автомобилестроении.* - Екатеринбург: УГАТУ, 2023. - 154 с.
10. ХАК, Г. *Турбодвигатели и компрессоры: Справ. пособие*, Лангкабель. -М.: ООО Издательство Астрель, 2003. - 351 с.
11. ЗЕЙНЕТДИНОВ, Р. А. Влияние неравномерности термогазодинамических процессов систем воздухообеспечения ДВС на коэффициент наполнения. В: *Сб. научн. трудов научно- практической конференции «Научное обеспечение инновационного развития АПК»*, Ч.1. СПб.: СПбГАУ. 2014. - С. 340-345.
12. BANARI, E., MANCUȘ, N. Impactul ecologic al utilizării biocarburanților. În: *Ingineria Automobilului*, nr. 45 / decembrie, 2017, p. 14-16, România, ISSN 2457 – 5275.
13. BANARI, E. Studies abouts the energy and economic performances of the DC4 11.0/12.5 biodiesel combustion engine. În: *Ingineria Automobilului*, nr. 66 / martie 2023, p. 22-24, România, ISSN 1842 – 4074.
14. BANARI, E. Studiul performanțelor energetice a motorului cu ardere internă alimentat cu biodiesel obținut din uleiuri vegetale. În: *Conferința „Știința în Nordul Republicii Moldova: realizări, probleme, perspective”*. Bălți, Moldova, 20-21 mai 2022, Ediția 6, p. 251-255.

15. BANARI, E. Parametrii fizico-chimici ai uleiului de motor alimentat cu diferite tipuri de combustibil. În: *Lucrări științifice, UASM*. Chișinău, 2013, vol. 38, (Inginerie Agrară și Transport auto), p. 279-280, ISBN 978-9975-64-125-8. 107.
16. BANARI, E. Aspecte ecologice la utilizarea combustibililor alternativi în MAI. În: *Lucrări științifice, UASM*. Chișinău, 2015, vol. 45, (Inginerie Agrară și Transport auto), p. 315-318, ISBN 978-9975-64-276-7.
17. BEȘLEAGĂ Ig., BANARI, E., JEMAN, V. Consecințele transportului auto asupra mediului ambiant. In: *Materialele Simpozionului Științific Internațional „Realizări și perspective în ingineria agrară și transport auto”, dedicat aniversării a 85 de ani de la fondarea Universității Agrare de Stat din Moldova*. UASM, Chișinău, 2018, vol. 51, p. 340-345, ISBN 978-9975-64-300-9.
18. BOBESCU, Gh., COFARU, C., CHIRU, A., *Motoare pentru automobile și tractoare*. Manual pentru MAI/Teoria și caracteristici. Chișinău: Tehnica, 1996. 238 p.
19. HĂBĂȘESCU, I., CEREMPEI, V., ESIR, M., NOVOROJDIN, D., BANARI, E., LUPAȘCU, T., DRAGALIN, I. Indicii de performanță a motorului cu aprindere prin comprimare alimentat cu biocombustibil. În: *Energetica Moldovei*. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția I, 21-24 septembrie 2005, Chișinău. Republica Moldova: Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei, 2005, pp. 672-683, ISBN 9975-62-145-7.
20. DARADUDA, N., GOROBET, V., BANARI, E. Tehnologia reparării autovehiculelor. Indicații metodice privind efectuarea lucrărilor de laborator. Chișinău: Tehnica-UTM, 2025-2025-87 p. ISBN 978-9975-64-540-8 (PDF).
21. LACUSTA, I., BEȘLEAGĂ, Ig., BANARI, E. Performanțele energetice ale motorului diesel alimentat cu biodiesel. In: *Agricultura Moldovei*. Revistă de știință și practică. № 7-8, 2009, p. 26-28, ISSN 0582-5229.
22. LACUSTA, I., BEȘLEAGĂ, Ig., BANARI, E. Impactul ecologic la utilizarea biocombustibilului pentru alimentarea motoarelor diesel. În: *Mediul Ambiant*. Revistă științifică, de informație și cultură ecologică. № 5 (47) octombrie, 2009, p. 20-23, ISSN 1810-9551.
23. NOVOROJDIN, D., BANARI, E., DICHIL, A. Particularitățile asistenței tehnice a autovehiculelor dotate cu propulsii-MAI cu supraalimentare avansată. In: *Materialele Simpozionului Științific Internațional „Realizări și perspective în ingineria agrară și transport auto”, dedicat aniversării a 85 de ani de la fondarea Universității Agrare de Stat din Moldova*. UASM, Chișinău, 2018, vol. 51, p. 277-279, ISBN 978-9975-64-300-9.
24. BANARI, E. Evaluarea performanțelor ecologice ale motorului cu aprindere prin comprimare alimentat cu diverse tipuri de combustibili. În: *Știința agricolă, UASM*, Chișinău, 2022, nr. 1, p. 92-96, ISSN 1857-0003.
25. BANARI, E., BEȘLEAGĂ, I., DARADUDA, N. Tractoare și automobile. Indicații metodice privind efectuarea lucrărilor de laborator. Chișinău: Tehnica-UTM, 2025-106 p. ISBN 978-9975-64-539-3 (PDF).
26. Google.com