

УДК 62-977

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-2\(30\)-805-817](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-2(30)-805-817)

Євсєєва Наталія Олексіївна кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, тел.: (061) 769-84-12, <https://orcid.org/0000-0002-3398-6537>

Сухонос Роман Федорович магістр, старший викладач кафедри двигунів внутрішнього згорання, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, тел.: (061) 769-82-41, <https://orcid.org/0000-0001-9683-3389>

Рябошапка Наталя Євгеніївна старший викладач кафедри двигунів внутрішнього згорання, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, тел.: (061) 769-82-41, <https://orcid.org/0000-0003-0334-8363>

Сметанко Олександр Віталійович магістр, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, тел.: (061) 769-82-41

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ 4-ТАКТНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

Анотація. Колісний транспорт є одним із основних засобів перевезення, і переважна більшість автомобілів на планеті дотепер використовують двигун внутрішнього згорання (ДВЗ), винайдений ще в ХІХ столітті. ДВЗ властиві негативні фактори впливу теплових двигунів на природу, такі як теплове забруднення, викиди продуктів згорання, велике споживання кисню. Незважаючи на те, що двигун внутрішнього згорання є недосконалим типом теплових машин, інші варіанти (електрокари, гібридні силові установки) на даний час ще менш зручні та надійні, дорожчі.

Підвищення ефективності роботи транспортних засобів, особливо з дизельними двигунами, для яких властива тривала робота з великими навантаженнями, залежить від надійної роботи двигуна та забезпечення його робочих характеристик. Оптимальний тепловий стан роботи двигуна є запорукою підтримання високих робочих показників. Особлива увага відводиться системі охолодження, яка передбачає оптимізацію температурного режиму та його вплив на робочі процеси, які відбуваються в системі охолодження двигуна.

Система охолодження двигуна внутрішнього згорання – це сукупність пристроїв, що забезпечують підведення охолоджуючого середовища до нагрітих деталей двигуна і відведення від них в атмосферу зайвої теплоти, яка

повинна забезпечувати охолодження і можливість підтримки в необхідних межах теплового стану двигуна при різних режимах і умовах роботи. Одним з важливих завдань сучасного двигунобудування є забезпечення високої ефективності охолодження робочого тіла в системі охолодження дизельного двигуна протягом всього життєвого циклу двигуна.

Метою даної роботи є дослідження та оптимізація процесів, які протікають в системі охолодження 4-тактного дизельного двигуна, а також визначення впливу окремих факторів на ефективність її роботи на прикладі двигуна КамАЗ-740. Необхідність забезпечення ефективної роботи двигуна внутрішнього згорання вимагає удосконалення та модернізацію системи охолодження.

Ключові слова: вентилятор, дизельний двигун, охолоджуюча рідина, система охолодження, радіатор.

Yevsyeyeva Natalya Oleksivna PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zhukovsky St., 64, Zaporizhzhia, tel.: (061) 769-84-12, <https://orcid.org/0000-0002-3398-6537>

Sukhonos Roman Fedorovych MSc, Senior lecturer of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zhukovsky St., 64, Zaporizhzhia, tel.: (061) 769-82-41, <https://orcid.org/0000-0001-9683-3389>

Ryaboshapka Natalya Yevheniyivna Senior lecturer Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zhukovsky St., 64, Zaporizhzhia, 69063, tel.: (061) 769-82-41, <https://orcid.org/0000-0003-0334-8363>

Smetanko Oleksandr Vitaliyovych MSc, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zhukovsky St., 64, Zaporizhzhia, tel.: (061) 769-82-41

RESEACH OF THE FEATURES OF THE COOLING SYSTEM OF A 4-STROKE DIESEL ENGINE

Abstract. Wheeled transport is one of the main means of transportation, and the vast majority of cars on the planet still use the internal combustion engine (ICE), invented back in the 19th century. ICE are characterized by the negative effects of heat engines on nature, such as thermal pollution, emissions and high oxygen consumption. Despite the fact that the internal combustion engine is an imperfect type of heat engine, other alternatives (electric or hybrid cars) are currently even less convenient and reliable, also more expensive.

Improving the efficiency of vehicles, especially with diesel engines, which are characterized by long-term work with heavy loads, depends on the reliable operation of the engine and ensuring its performance. The optimal thermal condition of the

engine is the key to maintaining high performance. Special attention is needed to the cooling system, which provides for the optimization of the temperature state of engine and its influence on the work processes that take place in the cooling system.

The internal combustion engine cooling system is a set of devices that ensure the supply of coolant to the heated parts of the engine and the removal of excess heat from them into the atmosphere. This should provide cooling and the ability to maintain the thermal state of the engine within the necessary limits under different operating modes and conditions. One of the important tasks of modern engine engineering is to ensure high efficiency of cooling the working fluid in the cooling system of a diesel engine throughout the entire life cycle of the engine.

The purpose of this work is to research and optimize the processes that occur in the cooling system of a 4-stroke diesel engine, as well as to determine the influence of individual factors on the efficiency of its operation using the KamAZ-740 engine as an example. The need to ensure efficient operation of the internal combustion engine requires improvement and modernization of the cooling system.

Keywords: cooling system, coolant, diesel engine, fan, radiator.

Постановка проблеми. Деталі двигуна, які контактують зі згораючою паливоповітряною сумішшю, під час роботи двигуна сильно нагріваються, тому виникає необхідність у системі охолодження. Внаслідок спалювання палива менше половини енергії витрачається на корисну роботу. При цьому, значна частина теплоти, що втрачається, відводиться від робочого тіла через систему охолодження. Відведення теплоти в систему охолодження необхідно для того, щоб перешкодити пригорянню поршневих кілець, обгорання сидел клапанів, появи задирів і заклинювання поршня, розтріскування головок циліндрів, виникнення детонації тощо. Для відводу теплоти в атмосферу частина ефективної потужності двигуна витрачається на привід вентилятора та насоса охолоджувальної рідини (залежно від конструкції системи охолодження) [1].

Отже, система охолодження двигуна внутрішнього згорання відіграє важливу функцію з підтримки робочої температури деталей двигуна в необхідних межах шляхом примусового відведення тепла від циліндрів, головки, поршнів двигуна і передачі його навколишньому повітрю.

Для зниження втрат на привід агрегатів системи охолодження важливо з'ясувати, скільки теплоти необхідно відводити в систему охолодження двигуна взагалі і яким способом можна зменшити цю кількість. Сер Гарі Рікардо (Harry Ricardo) приділяв цьому питанню велику увагу вже на початковому етапі розвитку двигунобудування. На експериментальному одноциліндровому двигуні з роздільними системами охолодження для головки блоку циліндра і для циліндра проводилися досліди з вимірювання кількості теплоти, що відводиться в ці системи [1]. Вимірювалась також кількість теплоти, що відводиться охолодженням протягом окремих фаз робочого циклу. Час згорання палива в ДВЗ дуже малий, але за цей період тиск

газів значно зростає (до 8...20 МПа), а температура досягає 1600...3200 К [2]. При згорянні в циліндрі інтенсивно протікають процеси переміщення газів, що сприяють тепловіддачі в стінки циліндра. Теплоту, заощаджену в цій фазі робочого циклу, можна перетворити в корисну роботу протягом наступного ходу розширення. При згорянні близько 6...8 % теплової енергії, що міститься в паливі, втрачається теплопередачею через стінки камери згорання і циліндра.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливі аспекти формування та розвитку сучасного двигунобудування висвітлюють багато вчених та інженерів, зокрема Жан Етьєн Ленуар, Ніколаус Август Отто, Рудольф Дизель. Безпосередньо дослідженнями систем охолодження двигунів внутрішнього згорання займалися багато вчених і спеціалістів, зокрема [3–6], однак питання підвищення продуктивності та надійності роботи двигунів в умовах сучасного розвитку транспортних засобів зумовлює подальші дослідження. Дослідження взаємозв'язку розрахункових енергетичних параметрів двигуна та практичної реалізації елементів його системи охолодження залишається актуальним питанням.

Мета статті – дослідження особливостей та оптимізація процесів, які протікають в системі охолодження 4-тактного дизельного двигуна, а також визначення впливу окремих факторів на ефективність її роботи на прикладі двигуна КамАЗ-740.

Виклад основного матеріалу. Двигуни сімейства КамАЗ-740 – дизельні, 8-циліндрові, з V-подібним компонуванням, рідинного охолодження. Встановлюються на вантажні автомобілі КамАЗ, автобуси НефАЗ, ЛиАЗ, ПАЗ, військову та залізничну техніку, судна. Розглядається двигун модифікації КамАЗ-740.10 потужністю $N_e = 154$ кВт, а також, для порівняння, форсована версія КамАЗ-740.13 потужністю $N_e = 191$ кВт [7, 8, 9].

Двигуни родини КамАЗ-740 мають рідинну систему охолодження класичного типу (рисунок 1), до складу якої входить: радіатор охолодження (поз. 5 на рис. 1), водяний насос (7), патрубки, термостати, вентилятор охолодження (6). Система охолодження замкнута з примусовою циркуляцією рідини. Тиск в системі створюється водяним насосом (7). Охолоджуюча рідина спочатку перетікає в порожнину лівого ряду циліндрів, а потім через трубку в порожнину правого ряду циліндрів. Під час руху охолоджуючої рідини через головки блоків циліндрів вона нагріється. Наступним елементом на шляху рідини є термостат (4). Тут, в залежності від ступеня нагріву, рідина рухається або назад до насоса («мале коло» охолодження), або до радіатора (5). В радіаторі (зазвичай 3-х або 4-х рядний) рідина охолоджується – завершується «велике коло» охолодження, далі охолоджуюча рідину прямує до насосу.

Вентилятор охолодження встановлений на валу гідروмуфти і має п'ять лопатей. Залежно від температури двигуна муфта автоматично вмикається чи вимикається. В систему охолодження в літній час заливається тосол або підготовлена вода, взимку – антифриз. При експлуатації в суворих районах півночі система охолодження обладнується підігрівачем. Ємність системи

охолодження двигуна КамАЗ-740 становить 25 літрів. З них на водяну «сорочку» двигуна припадає 18 літрів [7].

Оскільки двигуни сімейства КамАЗ-740 мають значну кількість модифікацій та використовуються для приводу різних агрегатів та машин, необхідно визначити параметри радіатора, який забезпечив би надійне охолодження як базового, так і форсованого двигуна. Для цього визначено кількість теплоти Q_1 , яку необхідно відводити системою охолодження двигуна.

Відведення теплоти системою охолодження викликає не тільки втрати теплової енергії, яка могла б бути реалізована в роботу, але також і прямі втрати частини ефективної потужності двигуна, внаслідок втрат на привід вентилятора і водяного насоса [10]. Відведення теплоти з охолоджуваної поверхні S в повітряне середовище залежить від перепаду температур між цією поверхнею і повітрям Δt , а також від коефіцієнта тепловіддачі охолоджуючої поверхні в повітря α . Цей коефіцієнт не змінюється скільки-небудь значно незалежно від того, чи утворена охолоджуюча поверхню пластинами радіатора (у системах рідинного охолодження) або ребрами циліндра (у двигуна повітряного охолодження). Досліджуваний двигун, як було сказано раніше, з системою рідинного охолодження [1].

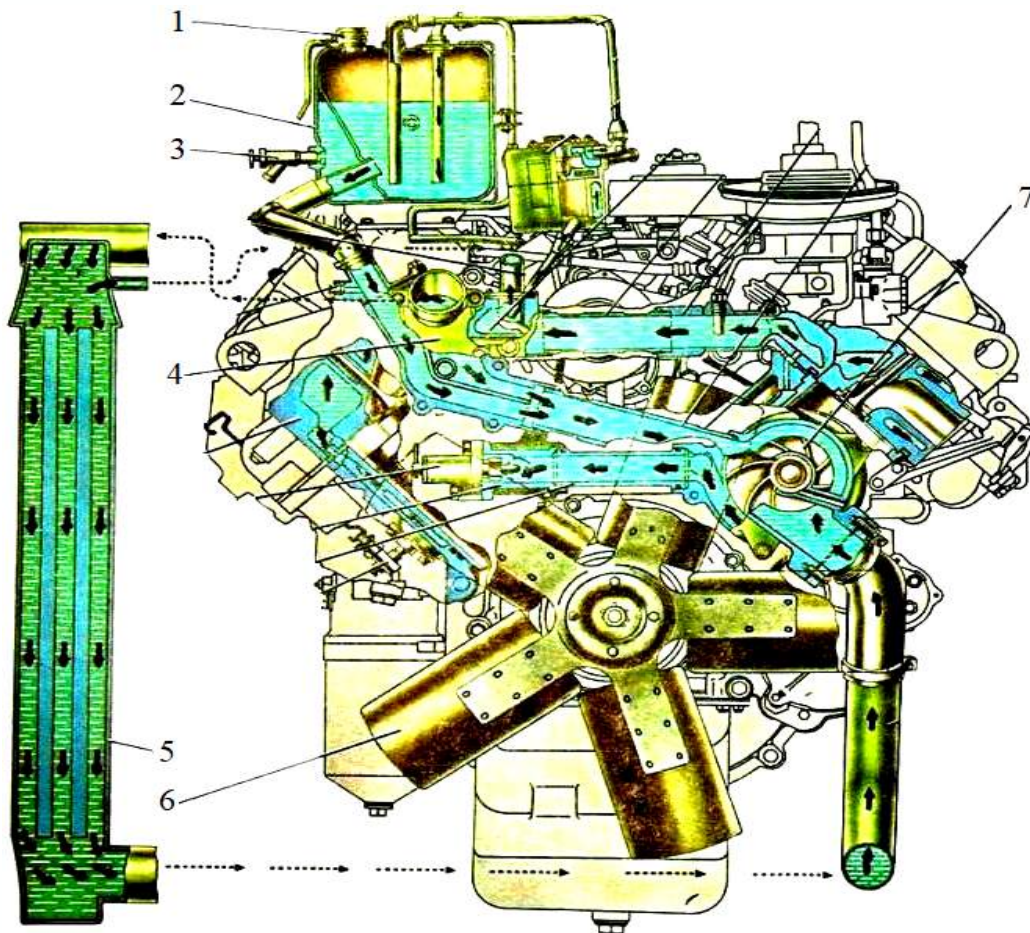


Рис.1 Система охолодження двигуна КамАЗ-740 [11]

Кількість охолоджуючого повітря тим менше, чим більше теплоти відводиться на одиницю його об'єму, тобто чим більше буде нагріватися охолоджуюче повітря. Це вимагає рівномірного розподілу повітря по всій охолоджуючій поверхні і максимального перепаду температур між нею і повітрям. У радіаторі системи рідинного охолодження створюються умови, при яких охолоджувана поверхня має майже рівномірне поле температур, а температура охолоджуючого повітря в міру руху його через радіатор поступово підвищується, досягаючи максимального значення на виході з радіатора. Перепад температур між повітрям і охолоджуваною поверхнею поступово зменшується. На перший погляд здається, що найбільш ефективним є глибокий радіатор, оскільки в ньому повітря нагрівається більше, проте слід розглянути це питання більш детально.

Коефіцієнт тепловіддачі поверхні α являє собою складну залежність від ряду факторів, однак найбільший вплив на його величину має швидкість потоку повітря v біля охолоджуючої поверхні. Зв'язок між ними приблизно $\alpha \sim v^{0,6...0,7}$.

При збільшенні швидкості повітря на 10 % відведення теплоти збільшується лише на 7 %. Швидкість потоку повітря пропорційна його витраті через радіатор. Якщо конструкція радіатора не змінюється, то для збільшення кількості відведеного тепла на 7 % слід збільшити частоту обертання вентилятора на 10 %, оскільки кількість повітря, що подається вентилятором, прямо залежить від частоти обертання. Тиск повітря при постійній площі перерізу вентилятора залежить від другого ступеня його частоти обертання, а потужність приводу вентилятора пропорційна її третього ступеня. Таким чином, для збільшення частоти обертання вентилятора на 10 % потужність приводу необхідно збільшити на 33 %, що при практичній реалізації зменшить механічний ККД двигуна [12].

Якщо лобову поверхню радіатора збільшити на 7 %, то пропорційно збільшуються площі прохідного перерізу і охолоджуючої поверхні радіатора, і, отже, кількість охолоджуючого повітря достатньо збільшити на ті ж 7 %, щоб відвести на 7 % більше теплоти, як було визначено вище. При цьому потужність вентилятора підвищується лише на 22,5 % замість 33 %. Якщо витрата повітря через вентилятор $V_z^{0,5}$ збільшити на 20 %, то кількість відведеної теплоти Q , пропорційна $V_z^{0,5}$ зросте на 11,5 %. Зміна витрати повітря збільшенням частоти обертання вентилятора на ті ж 20 % призводить до збільшення тиску повітряного потоку на 44 %, а потужність приводу вентилятора – на 72,8 %. Для збільшення тепловідведення на 20 % тим же шляхом слід збільшити витрату повітря на 35,5 % (точка і пунктирні стрілки 2 на рис. 1.1), що тягне за собою зростання тиску повітря на 84 %, а потужність приводу вентилятора – майже в 2,5 рази (на 149 %). Тому вигідніше збільшити лобову поверхню радіатора, ніж при тих же радіаторі і вентиляторі збільшувати частоту обертання останнього [1].

Якщо радіатор розділити по його глибині на дві рівні частини, то в передній перепад температур Δt_1 буде більше, ніж в задній Δt_2 , і, отже, передня частина радіатора буде охолоджуватися повітрям сильніше. Два радіатора, одержувані при поділі одного на дві частини, по глибині матимуть менший опір потоку охолоджуючого повітря. Тому дуже глибокий радіатор не вигідний для застосування.

Радіатор повинен бути виготовлений з матеріалу з високою теплопровідністю, а його опір потокам повітря і рідини має бути невеликим. Маса радіатора і об'єм рідини, що знаходиться в ньому, повинні бути також невеликі, так як це важливо для швидкого прогрівання двигуна і включення системи опалення в автомобілі. Для сучасних легкових автомобілів з низькою передньою частиною кузова потрібні радіатори невеликої висоти.

Для мінімізації енергетичних витрат важливо досягти високого ККД вентилятора, для чого використовується направляючий повітропровід, що має невеликий зазор по зовнішньому діаметру крильчатки вентилятора. Крильчатку вентилятора часто роблять з пластмаси, що гарантує точну форму профілю лопаток, їх гладку поверхню і малу шумність при роботі. Проте при високих частотах обертання такі лопатки деформуються, внаслідок чого знижується витрата повітря.

Підвищення температури рідини в радіаторі призводить до зростання його ККД. Тому в даний час застосовують герметичні радіатори, надлишковий тиск в яких підвищує температуру кипіння охолоджуючої рідини і, отже, температуру всієї матриці радіатора, який може бути менших розмірів і більш легким.

Таким чином, підвищення ефективності роботи системи рідинного охолодження, особливо на дизельних двигунах, що тривалий час працюють з великими навантаженнями, є актуальним питанням. Зазвичай, систему охолодження розраховують при роботі двигуна на номінальному режимі, оскільки при роботі на проміжних режимах навантаження має місце менша потужність насоса охолоджувальної рідини, а вентилятор обертається з меншою частотою. А при прогріві двигуна вентилятор може навіть не обертатись (завдяки електромуфті чи гідромуфті).

Гідравлічний розрахунок системи охолодження двигуна КамАЗ-740.10 виконуємо за розробленою авторами методикою [13, 14], визначаються оптимальні параметри системи, зокрема, кількість трубок в радіаторі, їх діаметр, швидкість руху потоку рідини.

Вихідними параметрами для розрахунку є паспортні характеристики двигуна та потужність теплового потоку Q_1 , що відводиться через систему охолодження. Для розрахунку термодинамічного циклу двигуна використано комп'ютерну програму Engine Calculation [2].

За результатами гідравлічного розрахунку встановлено наступне:

– режим руху рідини в системі охолодження турбулентний, число Рейнольдса $Re = 9669 \dots 170200$;

– зі збільшенням кількості трубок в радіаторі $n = 30 \dots 300$ шт. зміна основних параметрів в системі охолодження відбувається найбільш інтенсивно при $n = 30 \dots 100$ шт.; зі зростанням n всі процеси змінюються в меншій мірі;

– у вказаному діапазоні $n = 30 \dots 300$ шт. при зростанні кількості трубок значення швидкості потоку рідини в радіаторі зменшується з $w = 2,36$ м/с до $w = 1,38$ м/с, що пояснюється зростанням площі живого перерізу еквівалентного трубопроводу радіатора у 4,2 рази. При цьому гідравлічний діаметр трубок радіатора зменшується в 2,4 рази.

Будуємо поперечний переріз радіатора для визначення поперечного та поздовжнього кроку, і коефіцієнта живого перерізу. Крок трубок радіатора $S_1 = 14$ мм (рисунок 2).

За результатами гідравлічного та теплового розрахунків системи охолодження двигуна КамАЗ-740.10 потужністю $N_e = 154$ кВт визначено гідравлічний діаметр трубок радіатора $d_r = 7,65$ мм і їх кількість $n = 140$ шт., при яких забезпечується відведення теплового потоку потужністю $Q_1 = 93,6$ кВт від двигуна.

Результати теплового і гідравлічного розрахунків ефективності роботи системи охолодження двигуна КамАЗ-740, отримані розрахунковим визначили основні закономірності, що мають практичне застосування:

– залежність потужності теплового потоку Q_1 від гідравлічного діаметра трубок радіатора d_r ;

– залежність потужності теплового потоку Q_1 від кількості трубок радіатора n .

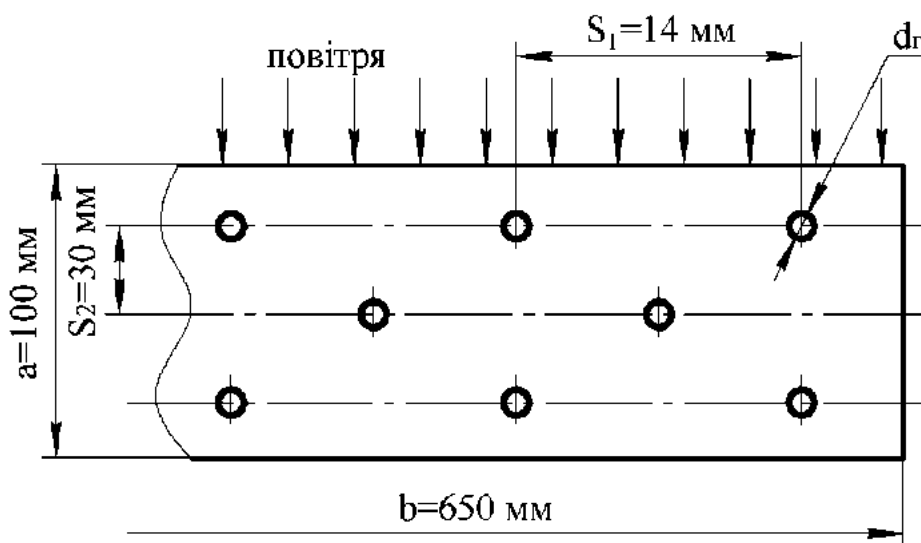


Рис. 2 Розрахункова схема радіатора

Двигуни КамАЗ-740 Євро-0 розвивають потужність від 154 кВт до 191 кВт. Для них величина кількості відведеної теплоти складає від $Q_1 = 93,6$ кВт до $Q_1 = 116,1$ кВт. Приймаємо, що габаритні розміри радіатора є незмінними. Тоді здійснюємо гідравлічний і тепловий розрахунки для двигуна потужністю 191 кВт ($Q_1 = 116,1$ кВт) (див. криві 2 на рис. 3, рис. 4) і порівнюємо результати з отриманими для двигуна потужністю 154 кВт (криві 1 на рис. 3, 4).

З аналізу рисунка 3 видно, що збільшення теплового потоку, який необхідно відводити через радіатор двигуна, зміщує графік вгору, тобто необхідно збільшувати діаметр трубок радіатора.

На рисунку 4 показано залежності кількості трубок радіатора від потужності теплового потоку двигуна КамАЗ-740 у двох виконаннях (потужністю 154 кВт і 191 кВт), а також апроксимовані значення цих кривих. З рисунку видно, що форсування двигуна (а з ним і збільшення величини теплового потоку Q_1) переміщує криву вліво.

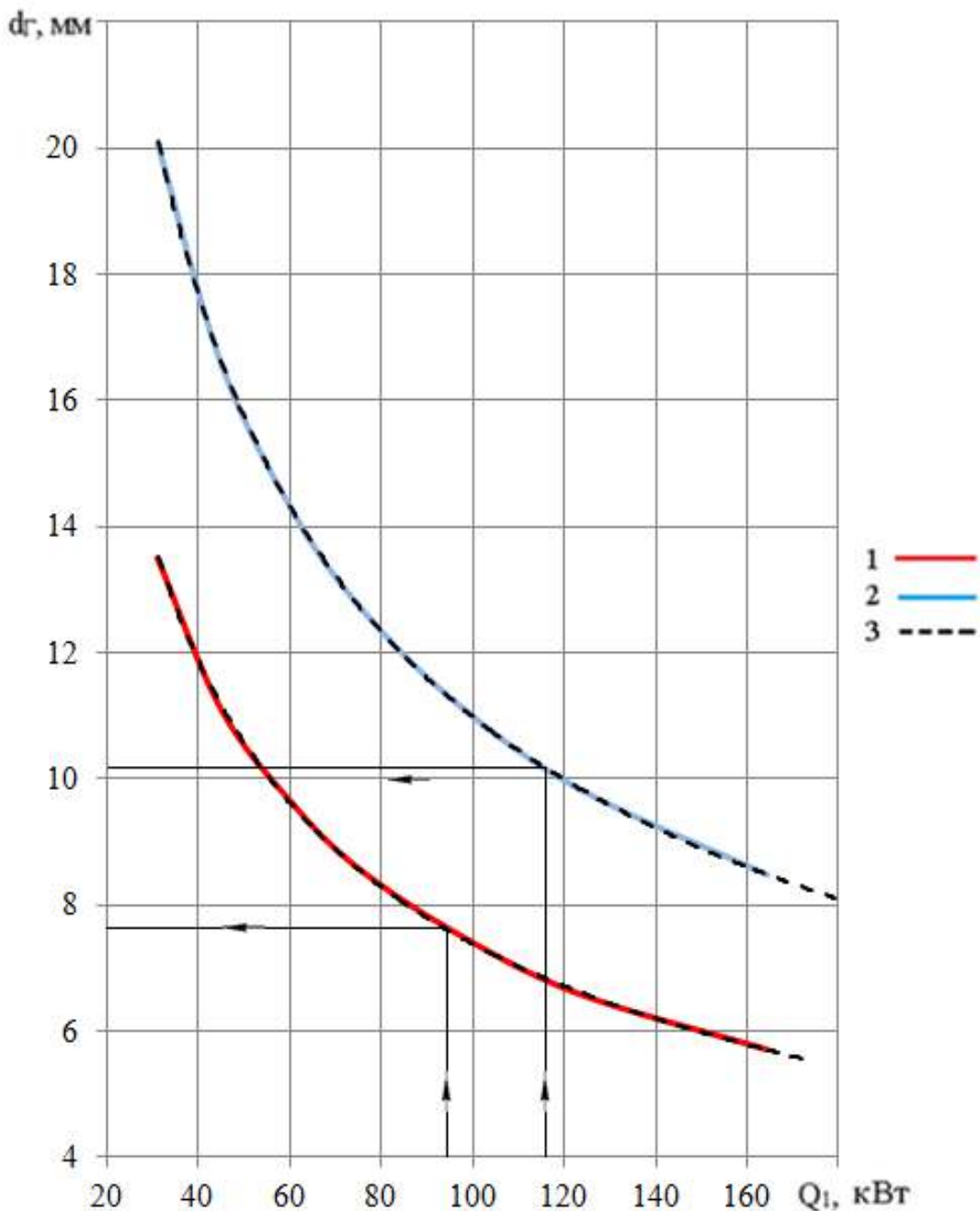
При апроксимації розрахованих даних для отримання функцій використовувалась квадратична та ступенева регресія. Апроксимація найчастіше використовується тоді, коли мова йде про задану функцію, як про функцію дискретного аргументу. Тут потрібно відшукати таку.

Використовуючи знайдені рівняння регресії $d_r = f(Q_1)$ та графік (рис. 3), можна аналітично та графічно знайти значення ефективного гідравлічного діаметру трубок радіатора для двигунів КамАЗ-740 різної потужності Для двигуна потужністю 154 кВт ($Q_1 = 93,6$ кВт):

$$d_r = 80,5553 \cdot 93,6^{-0,5192} = 7,63 \text{ мм.}$$

Для двигуна потужністю 191 кВт ($Q_1 = 116,1$ кВт):

$$d_r = 120,0541 \cdot 116,1^{-0,5195} = 10,16 \text{ мм.}$$



1 – для двигуна потужністю 154 кВт ($Q_1 = 93,6$ кВт); 2 – для двигуна потужністю 191 кВт ($Q_1 = 116,1$ кВт); 3 – апроксимовані значення

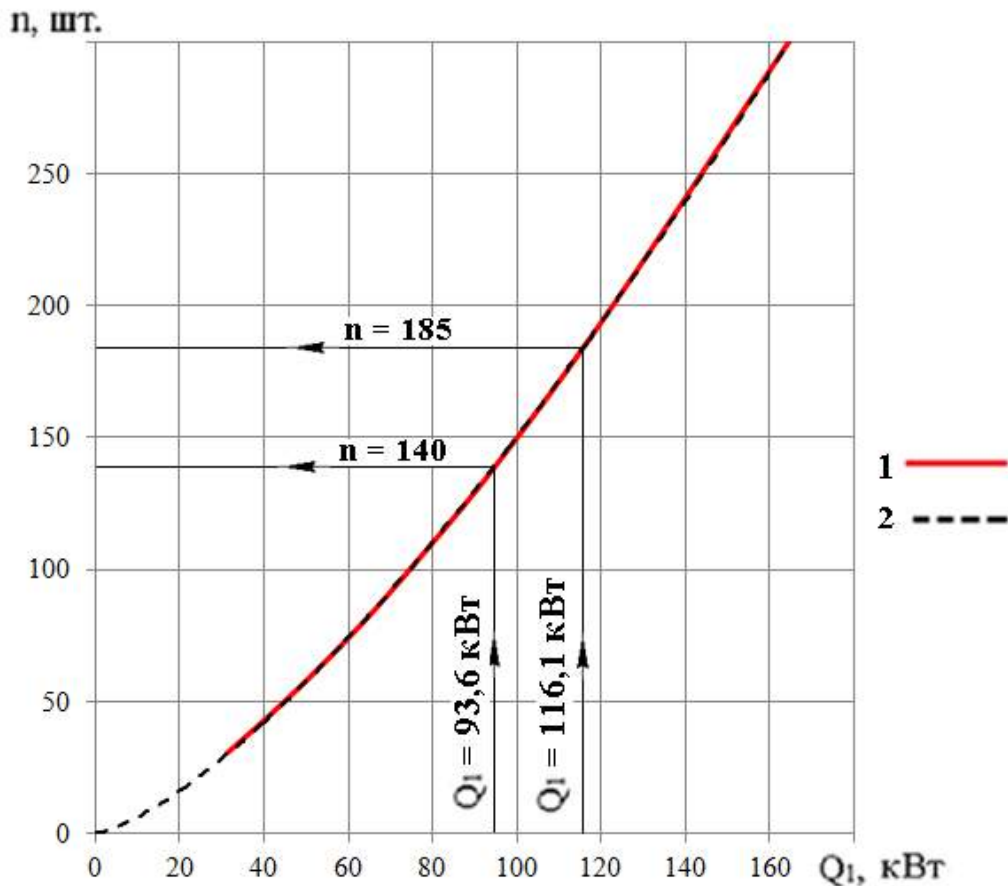
Рис. 3 Залежність гідравлічного діаметра трубок радіатора від потужності теплового потоку двигуна КамАЗ-740

Використовуючи рівняння регресії $n = f(Q_1)$ та графік (рис. 4), можна графічно та аналітично знайти значення кількості трубок радіатора для двигунів сімейства КамАЗ-740 різної потужності. Для двигуна потужністю 154 кВт ($Q_1 = 93,6$ кВт):

$$n = 0,0044 \cdot 93,6^2 + 1,1701 \cdot 93,6 - 11,5866 = 137 \text{ шт.}$$

Для двигуна КамАЗ-740 потужністю 191 кВт ($Q_1 = 116,1$ кВт):
 $n = 0,0044 \cdot 116,1^2 + 1,1701 \cdot 116,1 - 11,5866 = 184$ шт.

Отримані регресійні рівняння можуть бути використані при розрахунку параметрів радіатора системи охолодження інших моделей двигунів родини КамАЗ-740.



1 – розраховане значення; 2 – апроксимоване значення

Рис.4 Залежність гідралічного діаметра трубок радіатора від потужності теплового потоку двигуна КамАЗ-740 потужністю 154...191 кВт ($Q_1 = 93,6...116,1$ кВт)

Висновки. В роботі досліджено процеси, які протікають в системі охолодження системи охолодження 4-тактного дизельного двигуна. В ході роботи визначено вплив окремих параметрів та факторів на ефективність охолодження робочого тіла в системі охолодження; перевірено відомі положення теорії ДВЗ стосовно розподілу теплоти в системі охолодження на прикладі двигуна КамАЗ-740; визначено регресійні рівняння залежності потужності теплового потоку від гідралічного діаметра трубок радіатора $d_r = f(Q_1)$ двигунів родини КамАЗ-740; визначено регресійні рівняння залежності гідралічного діаметра трубок радіатора від потужності теплового

потоків $n = f(Q_1)$ двигуна КамАЗ-740. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні систем охолодження 4-тактних дизельних двигунів великої потужності.

Література:

1. Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль / Пер. с чешск., В.Б. Иванова; Под ред. А.Р. Бенедиктова. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
2. Слинько Г.І. Тепловий і динамічний розрахунок ДВЗ : навчальний посібник з курсового проектування / Г.І. Слинько, Р.Ф. Сухонос, В.В. Слинько. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 130 с.
3. Адров Д.С. Математичне моделювання роботи системи охолодження двигуна внутрішнього згорання утилізаційної установки при визначенні часу прогріву / Д.С. Адров // Сборник научных трудов ДонИЖТ. – 2011. – № 27. – С. 105–112.
4. Марченко А.П. Обґрунтування необхідності регулювання роботи системи охолодження дизеля наземної транспортної машини / А.П. Марченко, А.Ю. Федоров, О.Ю. Лінков, В.Ф. Клімов // Автомобильный транспорт. – 2018. – Вып. 43. – С. 12–17. DOI:10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.12
5. Абраменко В.Г. Модифікація системи охолодження ГСУ GM Voltac для покращення економічних показників / В.Г. Абраменко // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. – 2020. – № 18. – С. 37–44. DOI:10.30977/VEIT.2020.19.0.37
6. Abdelghaffar W.A. Effects of coolant temperature on the performance and emissions of a diesel engine / W.A. Abdelghaffar, M.M. Osman, M.N. Saeed, A.I. Abdelfatteh // ASME. Internal combustion engine division spring technical conference, design, operation, and application of modern internal combustion engines and associated systems, Paper № ICES2002-464, 2002, pp. 187–197. DOI:10.1115/ICES2002-464
7. Мамедов В. Новые дизели КамАЗ / В. Мамедов // Сайт «Основные средства». – 2003. – № 5. – URL: <https://os1.ru/article/7120-novye-dizeli-kamaz>
8. Двигатель КамАЗ-740 – один из лучших грузовых тяговых моторов // Сайт «avtodvigateli.com». – URL: <http://avtodvigateli.com/marki/kamaz-740.html>
9. Технические характеристики двигателей КамАЗ // Сайт «Гидро-Спец-Торг». – URL: <https://gst.com.ua/articles/49-tekhnicheskie-kharakteristiki-dvigatelij-kamaz>
10. Толстоногов, А.П. Системы охлаждения поршневых ДВС: Учеб. пособие / А.П. Толстоногов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002. – 208 с.
11. Гринченко Е. КАМАЗ, система охлаждения: устройство // Сайт «FB». – 2016. – URL: <http://fb.ru/article/284056/kamaz-sistema-ohlajdeniya-ustroystvo-i-remont>
12. Автомобили КАМАЗ // Сайт «Банга». – URL: <https://banga.ua/pages/rukovodstvo-ro-ekspluatatsii-i-remontu-dvigateli-kamaz-740/3750-sistema-okhlazhdeniya>
13. Євсєєва Н.О. Дослідження системи охолодження 4-тактного дизельного двигуна / Н.О. Євсєєва, О.В. Сметанко // Сучасні технології на автомобільному транспорті та машинобудуванні : Наукові праці Міжнарод. наук.-практ. конф., 15-18 жовтня 2019. – Х.: ХНАДУ, 2019. – С. 176–177.
14. Євсєєва Н.О. Особливості розрахунку системи охолодження двигуна КамАЗ-740 / Н.О. Євсєєва, В.О. Сметанко // Тиждень науки-2019. Транспортний факультет : щоріч. наук.-практ. конф., 15-19 квітня 2019 р. : тези доп. / Редкол.: В.В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. – С. 91–92.

References:

1. Mackerle, Yu. (1987). *Sovremennyj ekonomichnyj avtomobil [Modern economical car]*. A.R. Benediktova (Ed.). Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

2. Slyn'ko, G.I., Sukhonos, R.F. & Slinko V.V. (2024). *Teplovij i dinamichnij rozrahunok DVZ : navchal'nij posibnik z kursovogo proektuvannja [Thermal and dynamic calculation of internal combustion engine: manual for course project]*. – Zaporizhzhia: National University «Zaporizhzhia Polytechnic» [in Ukrainian].

3. Adrov, D.S. (2011). Matematichne modelyuvannya roboti sistemi oholodzhennya dviguna vnutrishnogo zgorannya utilizacijnoyi ustanovki pri viznachenni chasu progrivu [Mathematical modeling of the cooling system of the internal combustion engine of the utilization plant when determining the warm-up time] // *Sbornik nauchnyh trudov DonIZhT – Collection of scientific papers DonIZHT*, 27, 105–112 [in Ukrainian].

4. Marchenko, A.P., Fedorov, A.Yu., Linkov, O.Yu. & Klimov, V.F. (2018). Obgruntuvannya neobhidnosti regulyuvannya roboti sistemi oholodzhennya dizelya nazemnoyi transportnoyi mashini [Justification of the need to regulate the operation of the diesel cooling system of a land transport vehicle]. *Avtomobilnyj transport – Automobile transport*, 43, 12–17. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.12 [in Ukrainian].

5. Abramenko, V.G. (2020). Modifikaciya sistemi oholodzhennya GSU GM Voltec dlya pokrashennya ekonomichnih pokaznikov [Modification of the GM Voltec GSU cooling system to improve economic performance]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tehnologiyi – Vehicle and electronics. Innovative technologies*, 18, 37–44. DOI:10.30977/VEIT.2020.19.0.37. [in Ukrainian].

6. Abdelghaffar, W.A., Osman, M.M., Saeed, M.N. & Abdelfatteh, A.I. (2002) Effects of coolant temperature on the performance and emissions of a diesel engine. ASME. Internal combustion engine division spring technical conference, design, operation, and application of modern internal combustion engines and associated systems, Paper № ICES2002-464, (pp. 187–197). DOI:10.1115/ICES2002-464 [in English].

7. Mamedov, V. (2003). Novye dizeli KamAZ [New KamAZ diesels]. *Osnovnye sredstva – Fixed assets*, 5. Retrieved from <https://os1.ru/article/7120-novye-dizeli-kamaza> [in Russian]

8. Dvigatel KamAZ-740 – odin iz luchshih gruzovyh tyagovyh motorov [The KamAZ-740 engine is one of the best truck engine]. *avtodvigateli.com*. – Retrieved from <http://avtodvigateli.com/marki/kamaz-740.html> [in Russian]

9. Tehnicheskie charakteristiki dvigatelej KamAZ [Technical characteristics of KamAZ engines]. *gst.com.ua*. Retrieved from <https://gst.com.ua/articles/49-tehnicheskie-kharakteristiki-dvigatlej-kamaz> [in Russian]

10. Tolstonogov, A. P. (2002). *Sistemy ohlazhdeniya porshnevnyh DVS [Cooling systems for piston internal combustion engines]*. – Samara: Samara State Aerospace University [in Russian].

11. Grinchenko, E. (2016). KAMAZ, sistema ohlazhdeniya: ustrojstvo [KAMAZ, cooling system: device]. *fb.ru*. Retrieved from <http://fb.ru/article/284056/kamaz-sistema-ohlajdeniya-ustrojstvo-i-remont> [in Russian]

12. Avtomobili KAMAZ [KAMAZ vehicles]. *banga.ua*. Retrieved from <https://banga.ua/pages/rukovodstvo-po-ekspluatatsii-i-remontu-dvigateli-kamaz-740/3750-sistema-okhlazhdeniya> [in Russian]

13. Yevsyeyeva, N.O., Smetanko, O.V. (2019). Doslidzhennya sistemi oholodzhennya 4-taktnogo dizelnogo dviguna [Study of the cooling system of a 4-stroke diesel engine]. Proceedings from International Scientific and Practical Conference *Suchasni tehnologiyi na avtomobilnomu transporti ta mashinobuduvanni – Modern technologies in road transport and mechanical engineering*, (pp. 176–177). Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].

14. Yevsyeyeva, N.O., Smetanko, O.V. (2019). Osoblivosti rozrahunku sistemi oholodzhennya dviguna KamAZ-740 [Features of the calculation of the KamAZ-740 engine cooling system]. Proceedings from Annual Scientific and Practical Conference *Tizhden nauki-2019. Transportnij fakultet – Science Week-2019. Faculty of Transport*. V.V. Naumik (Ed.), (pp. 91–92). Zaporizhzhia: National University «Zaporizhzhia Polytechnic» [in Ukrainian].