

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Саух Олександр Володимирович

УДК 631.331.5:633.1

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ
ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ
АВТОТРАНСПОРТНИХ ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Саух О.В.

Керівник роботи

Грудовий Р.С.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Саух Олександр Володимирович. Дослідження та удосконалення процесу функціонування системи охолодження автотранспортних поршневих двигунів. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Магістерська робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми підвищення надійності та довговічності автотранспортних поршневих двигунів шляхом удосконалення системи очищення охолоджувальної рідини. У роботі обґрунтовано необхідність застосування ефективних пристроїв очищення охолоджувальної рідини в умовах ускладнення конструкції сучасних систем рідинного охолодження та підвищення вимог до їх експлуатаційної надійності.

Проаналізовано причини утворення забруднень у системах охолодження, зумовлені фізико-хімічною взаємодією антифризу з елементами та матеріалами системи, а також вплив експлуатаційних факторів. Доведено неможливість забезпечення абсолютної чистоти охолоджувальної рідини в реальних умовах експлуатації, що підтверджує доцільність використання спеціальних пристроїв її очищення.

Розроблено, виготовлено та експериментально випробувано комплексну лабораторну установку для дослідження автомобільних фільтрів охолоджувальної рідини різних конструкцій і принципів дії, а також створено й апробовано методику їх експериментальних досліджень. Проведено конструктивний аналіз зарубіжних зразків фільтрів, який показав їх невідповідність вимогам сучасної автомобільної техніки через наявність суттєвих експлуатаційних і конструктивних недоліків.

На основі узагальнення експлуатаційного досвіду сформовано комплекс вимог до перспективного пристрою очищення охолоджувальної рідини автотранспортних двигунів. За результатами досліджень і дослідно-конструкторських робіт розроблено інноваційний високоефективний гідроциклонний фільтр-сепаратор, який забезпечує підвищення ефективності очищення охолоджувальної рідини та сприяє зростанню надійності системи охолодження двигуна в цілому.

Ключові слова: система охолодження двигуна, охолоджувальна рідина, очищення охолоджувальної рідини, антифриз, забруднення, фільтр охолоджувальної рідини, гідроциклонний фільтр-сепаратор.

ANNOTATION

Saukh Oleksandr Volodymyrovych. Research and Improvement of the Operating Process of the Cooling System of Automotive Piston Engines. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The master's thesis is devoted to solving an urgent scientific and applied problem of increasing the reliability and durability of automotive piston engines by improving the cooling fluid purification system. The study substantiates the necessity of using efficient cooling fluid purification devices under conditions of increasing structural complexity of modern liquid cooling systems and higher requirements for their operational reliability.

The causes of contamination formation in cooling systems, resulting from the physicochemical interaction of antifreeze with system components and materials, as well as the influence of operational factors, are analyzed. The impossibility of ensuring absolute purity of the cooling fluid under real operating conditions is proven, which confirms the expediency of using specialized devices for its purification.

A comprehensive laboratory test bench for studying automotive cooling fluid filters of various designs and operating principles has been developed, manufactured, and experimentally tested. A methodology for experimental investigation of cooling fluid filters has also been developed and validated. A structural analysis of foreign filter designs has been carried out, showing their non-compliance with the requirements of modern automotive engineering due to significant operational and design shortcomings.

Based on the generalization of operational experience, a set of requirements for a promising cooling fluid purification device for automotive engines has been formulated. As a result of the conducted research and design work, an innovative high-efficiency hydrocyclone filter–separator has been developed, which improves the efficiency of cooling fluid purification and contributes to increasing the overall reliability of the engine cooling system.

Keywords: engine cooling system, cooling fluid, cooling fluid purification, antifreeze, contamination, cooling fluid filter, hydrocyclone filter–separator.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СИСТЕМ РІДИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ДВИГУНІВ.....	8
1.1. Тенденції розвитку систем рідинного охолодження двигунів.....	8
1.2. Несправності в системах рідинного охолодження та їх вплив на роботу двигуна.....	18
1.3. Забруднення охолоджуючої рідини та їх джерела.....	22
РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ФІЛЬТРА ОХОЛОДЖУЮЧОЇ РІДИНИ.....	25
2.2. Аналіз патентної інформації.....	25
2.2. Формування вимог до перспективного фільтра охолоджуючої рідини.....	32
2.3. Розробка перспективної конструкції фільтра охолоджуючої рідини.....	34
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРІВ ОХОЛОДЖУЮЧОЇ РІДИНИ.....	39
3.1. Лабораторна установка для проведення досліджень і обладнання.....	39
3.2. Результати досліджень зарубіжних зразків фільтрів охолоджуючої рідини..	42
3.3. Результати досліджень розробленого гідроциклонного фільтра- сепаратора та їх порівняння із зарубіжними аналогами.....	44
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток автотранспортної техніки характеризується постійним зростанням літрової потужності, термічної напруженості та екологічних вимог до автотранспортних поршневих двигунів. У таких умовах система охолодження набуває визначального значення для забезпечення надійної та стабільної роботи двигуна, збереження його ресурсних показників і виконання нормативних вимог щодо токсичності та паливної економічності. Навіть незначні порушення у функціонуванні системи охолодження призводять до локальних перегрівів, прискореного зносу деталей, зниження потужності та передчасних відмов двигуна.

Актуальність дослідження зумовлена ускладненням конструкцій сучасних систем рідинного охолодження, широким застосуванням різномірних матеріалів, зменшенням внутрішніх перерізів каналів охолодження та використанням високоефективних теплообмінників. За цих умов суттєво зростають вимоги до якості та чистоти охолоджувальної рідини, оскільки наявність механічних домішок, продуктів корозії та деградації антифризу негативно впливає на тепловідвід, гідравлічні характеристики системи та надійність її елементів.

Практика експлуатації автотранспортних двигунів свідчить, що забезпечення абсолютної чистоти охолоджувальної рідини в реальних умовах є неможливим, а традиційні підходи до її очищення не відповідають вимогам сучасної техніки. Це зумовлює необхідність поглибленого дослідження процесів функціонування системи охолодження, механізмів утворення забруднень і їх впливу на тепловий режим двигуна, а також розробки й упровадження більш ефективних технічних рішень з очищення охолоджувальної рідини.

У зв'язку з цим дослідження та удосконалення процесу функціонування системи охолодження автотранспортних поршневих двигунів є актуальним науково-прикладним завданням, розв'язання якого сприятиме підвищенню надійності, довговічності та експлуатаційної ефективності двигунів, зниженню

витрат на технічне обслуговування і ремонт, а також підвищенню загального рівня технічної безпеки автотранспортних засобів.

Мета дослідження – метою роботи є наукове обґрунтування необхідності фільтрації охолоджуючої рідини і створення на основі досліджень технології та пристроїв очищення охолоджуючої рідини для підвищення технічного рівня автотранспортних поршневих двигунів.

Завдання дослідження:

- виконати аналіз проблем забруднення та очищення охолоджуючої рідини і системи рідинного охолодження в цілому, оцінити ступінь доцільності застосування фільтрів охолоджуючої рідини на автотранспортних поршневих двигунах;
- розробити і виготовити лабораторну установку для дослідження автомобільних пристроїв очищення охолоджуючої рідини різних конструкцій і принципів дії;
- створити ефективний пристрій очищення охолоджуючої рідини і провести його лабораторні дослідження.

Об'єкт дослідження – система рідинного охолодження автотранспортних поршневих двигунів, пристрої для очищення охолоджуючої рідини в процесі експлуатації двигунів.

Предмет дослідження – закономірності утворення та накопичення забруднень в охолоджувальній рідині, а також конструктивно-технологічні та гідродинамічні параметри пристроїв для очищення охолоджувальної рідини, що визначають ефективність їх роботи та вплив на надійність і тепловий режим двигуна.

Методи наукового дослідження. У процесі виконання магістерської роботи використані: апробовані методи моделювання процесів течії рідини та очищення рідин від твердих частинок, методи математичної статистики, комп'ютерне моделювання, інженерний експеримент, хімічний та фракційний аналіз.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. **Саух О.В.** Розробка перспективної конструкції фільтра охолоджуючої рідини. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 82-86.

2. Грудовий Р.С., **Саух О.В.** Несправності в системах рідинного охолодження та їх вплив на роботу двигуна. Міжнародній науково-практичній конференції до Дня автомобіліста та дорожника “Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура ‘2025” (MAITRI 2025). 30-31 жовтня 2025 року. Харків. С.

3. **Саух О.,** Заруцький С. Грудовий Р. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам’янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам’янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. Забруднення охолоджуючої рідини та їх джерела. С. 227-229.

Практична значущість. Створений інноваційний гідроциклонний фільтр-сепаратор охолоджувальної рідини може бути використаний як елемент серійних або модернізованих систем охолодження, що забезпечує зниження рівня забруднення антифризу, стабілізацію теплового режиму двигуна та зменшення інтенсивності корозійно-ерозійного зносу елементів системи. Це сприяє подовженню міжсервісних інтервалів, зменшенню витрат на технічне обслуговування і ремонт та підвищенню загальної експлуатаційної ефективності автотранспортних засобів.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 19 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 52 сторінки комп’ютерного тексту, містить 49 рисунків та 1 таблицю.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СИСТЕМ РІДИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ДВИГУНІВ

1.1. Тенденції розвитку систем рідинного охолодження двигунів

Високі енергетичні, екологічні та інші показники сучасних автомобільних двигунів були б недсяжні без ефективних СРО [1,2].

До початку XX століття застосовувалася система повітряного охолодження двигуна (протилежним потоком повітря або за допомогою вентилятора), при якому зайва теплота віддається навколишньому повітрю безпосередньо. Для поліпшення відведення тепла від циліндрів і головок вони відливаються з легких сплавів і забезпечуються ребрами, що збільшують площу контакту з набігаючим повітрям.

Починаючи з 1910 року застосовувалася термосифонна система охолодження, в якій блок циліндрів двигуна і його головка виконувалися з каналами, заповненими охолоджувальною рідиною (ОР). Під час роботи двигуна вода нагрівалася, а її щільність зменшувалася, і вона піднімалася по водозбірній трубі у верхню частину радіатора, де охолоджуючись, поверталася назад у блок двигуна. У цей час для обдування радіатора застосовувався вентилятор, а пізніше в систему було додано водяний насос для поліпшення циркуляції ОР у системі. Після 1922 року в дану систему вперше додали термостат [3,4,5].

Поступово потужність двигунів зростала, а СРО ускладнювалася. До середини другої половини XX століття стала широко застосовуватися закрыта примусова система охолодження, в якій застарілий термостат сифонного типу був замінений на термостат з термосиловим елементом з твердим наповнювачем, а замість води застосовувалася її суміш з низькотемпературним концентратом (антифриз). До такої системи став входити розширювальний бачок, датчик

температури, насос ОР, термостат, радіатор, теплообмінник обігрівача салону, масляний радіатор двигуна.

На сьогоднішній день повітряне охолодження двигунів легкових автомобілів практично не застосовується через очевидні недоліки цього способу охолодження [3-7]. Тому в даний час всі зусилля розробників і виробників автомобільних двигунів спрямовані на підвищення ефективності СРО.

Сучасна СРО значно ускладнилася [1-5,8,9] порівняно з системами минулого століття (рис. 1.1).

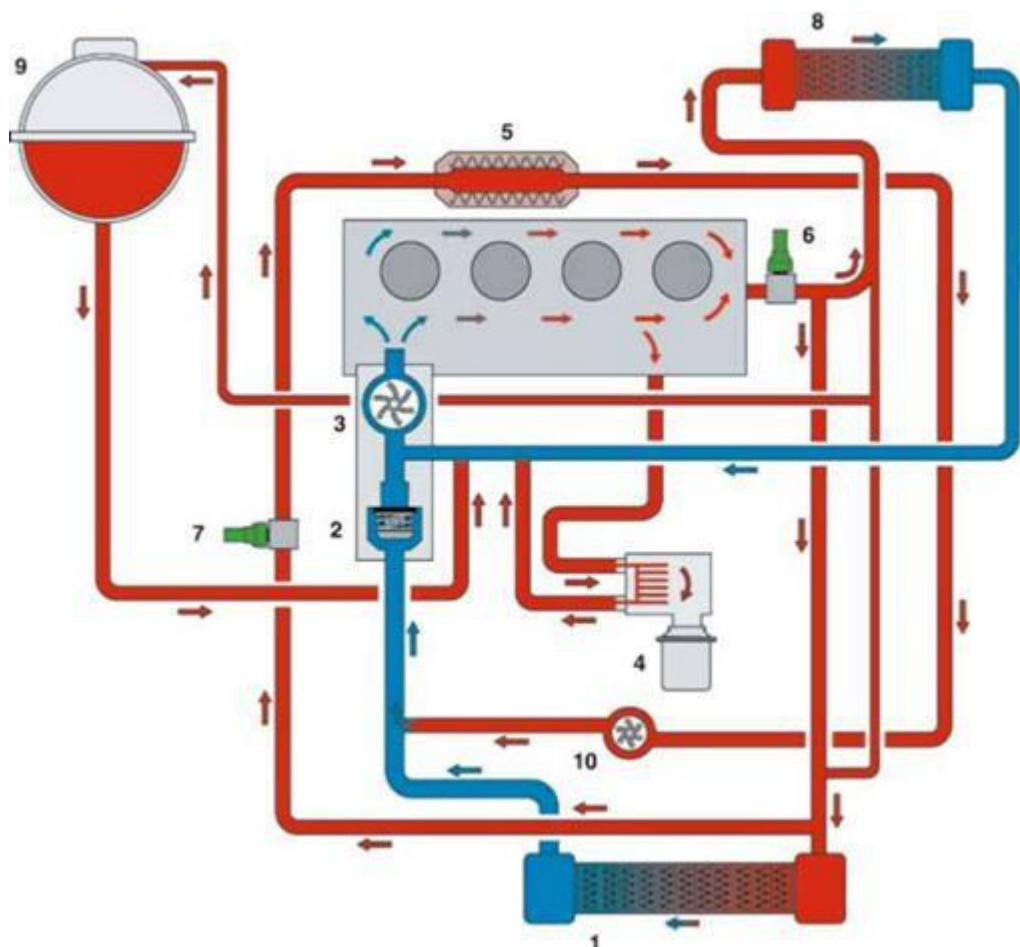


Рис. 1.1. Пристрій типової СРО сучасних двигунів [3]: 1 – радіатор охолодження двигуна; 2 – термостат; 3 – насос ОР; 4 – масляний радіатор; 5 – радіатор системи рециркуляції відпрацьованих газів; 6 – датчик температури ОР терморегулювання ДВЗ; 7 – датчик температури ОР; 8 – теплообмінник обігрівача; 9 – розширювальний бачок; 10 – додатковий насос ОР.

Також в подібну систему, крім власне радіатора охолодження двигуна, можуть входити пристрої кондиціонування, охолоджувачі наддувного повітря і рециркульованих ВГ тощо. На сучасних автомобілях система охолодження, крім основної функції (охолодження двигуна), виконує ряд додаткових [3-9]:

агрівання повітря в системі опалення, вентиляції та кондиціонування;

- охолодження масла в системі змащення;
- охолодження відпрацьованих газів в системі рециркуляції ВГ;
- охолодження повітря в системі турбонаддуву та її компонентів;
- охолодження робочої рідини в автоматичній коробці передач. Однак у

традиційних СРО з традиційним термомеханічним термо- статом, насосом з механічним приводом і вентилятором, оптимізувати тепловий стан двигуна практично неможливо через відсутність керуючих взаємозв'язків між цими трьома найважливішими вузлами системи.

До останнього часу СРО залишалася, мабуть, єдиною з систем двигуна, не пов'язаною із застосуванням електроніки.

У зв'язку з цим в сучасних двигунах системи рідинного охолодження мають значні відмінності від традиційних конструкцій.

Вентилятор радіатора

У сучасних СРО найбільшого поширення набув електричний привід вентилятора, що забезпечує широкі можливості для регулювання (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Вентилятори радіаторів з електроприводом фірми Delphi для сучасних СРО [10].

Термостат. В даний час в СРО почали використовуватися термостати нового покоління з пропорційним електрокеруванням клапаном і вбудованою діагностикою. При використанні такого термостата принципово змінюються і розширюються можливості управління потоками теплоносія в СРО, здійснюється гнучке регулювання температури в залежності від режимних параметрів двигуна, температури в будь-якій зоні гідравлічного тракту СРО, температури деталей двигуна і навколишнього повітря та ін. [13,14,15,16].

Крім інших, застосовується конструкція термостата з електричним підігрівом воскового елемента, який забезпечує двоступеневе регулювання температури ОР [3,4,5].

У термостаті з електронним управлінням фірми Behr Thermot-tronic GmbH використовуються електричні підключення з інтегрованим у восковий елемент нагріваним опором, що дозволяє примусово розширювати наповнювач (віск) і безпосередньо регулювати температурний діапазон двигуна до оптимальної температури (рис. 1.3) [7].

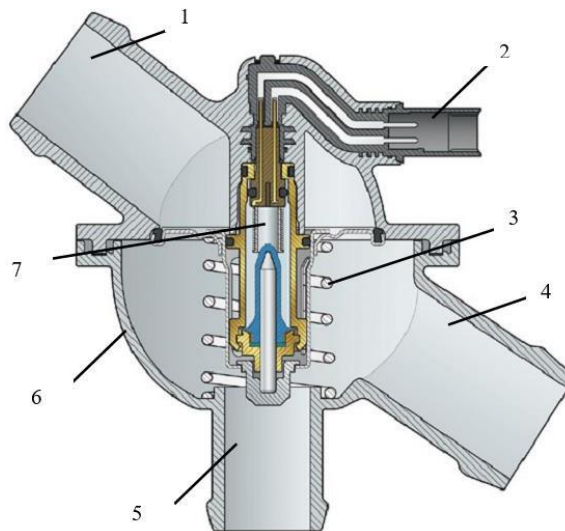


Рис. 1.3. Термостат з електронним управлінням фірми Behr Thermot-tronic GmbH [17]: 1 – вихідний патрубок; 2 – електричний роз'єм; 3 – поворотна пружина; 4 – вхідний патрубок; 5 – байпасний патрубок; 6 – корпус термостата; 7 – термoeлемент

Насоси ОР також зазнали значних змін у конструкції. У сучасних СРО все частіше застосовуються рідинні насоси з електроприводом (рис. 1.4) [18].

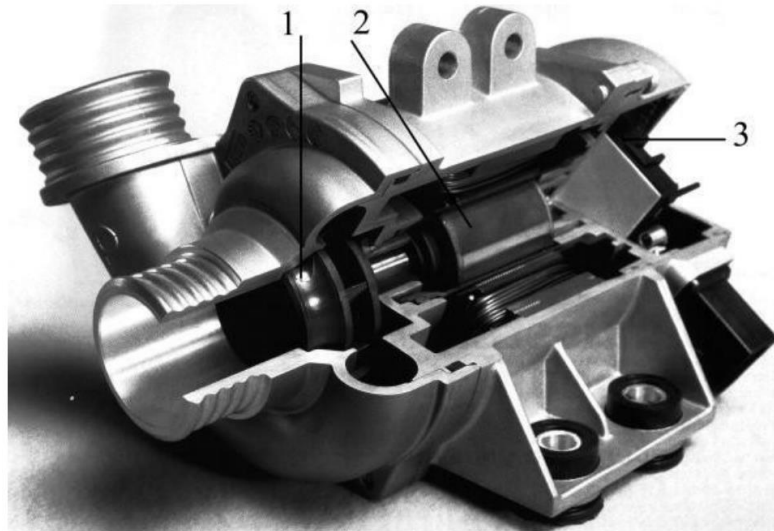


Рис. 1.4. Електричний рідинний насос фірми Pierburg для BMW 3- series (E90) [8]: 1 – крильчатка; 2 – електродвигун зі статором, захищеним від впливу рідини; 3 – електронна виконавча система.

Застосування електричного насоса (у порівнянні зі звичайним механічним) і використання електрокерованих термостатів дозволяє досягати більш гнучкого управління потоками теплоносія і забезпечити зниження втрат на переміщення ОЖ. Електричний насос дозволяє забезпечувати необхідні потоки ОЖ незалежно від частоти обертання колінчастого вала, що характерно для механічних насосів [1, 9].

Прокладка головки блоку циліндрів двигуна. Прокладки ГБЦ сучасних двигунів включають в себе датчики температури, тиску і витрати рідини [4, 5]. Використання інформації, що отримується від цих датчиків, дозволяє оптимізувати роботу СРО і двигуна в цілому (рис. 1.5).

Радіатор системи охолодження. Конструкція і технологія виготовлення радіаторів СЖО в останні роки також зазнають змін. Досягнення в області твердого паяння легованими припоями без застосування флюсів і розвиток методів лазерного зварювання дозволили створити конструкції з мідних сплавів з високою механічною міцністю при значному зниженні маси радіатора і його габаритів.

Крім цього, сучасний радіатор відрізняють від застарілих конструкцій величина прохідного перетину трубок, які намагаються максимально зменшити, для досягнення компактності радіатора і підвищення ефективності його тепловіддачі [6,7,10].

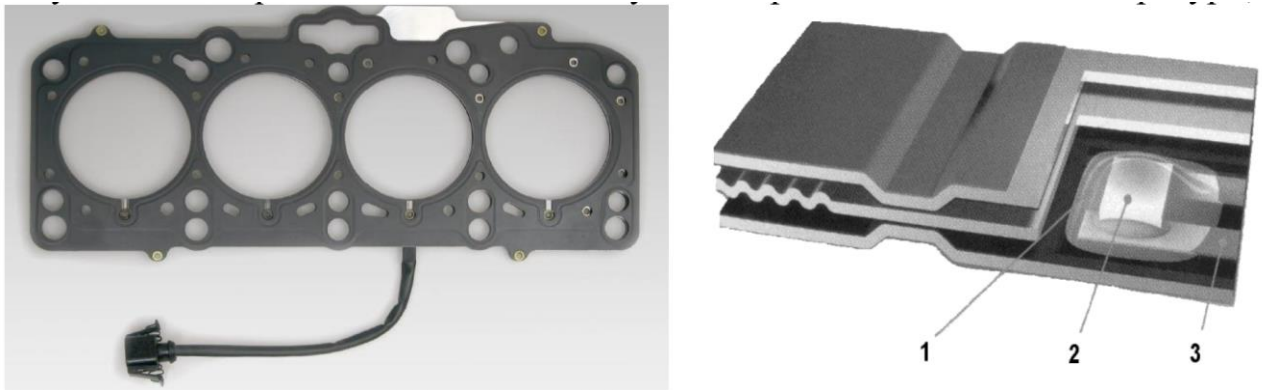


Рис. 1.5. Прокладка головки блоку циліндрів з датчиками температури, тиску і витрати рідини та схема розташування чутливих елементів датчиків в прокладці [25]: 1 – захисне покриття; 2 – чутливий елемент датчика; 3 – струмопроводи.

Фільтр ОР (ФОР) не є обов'язковим компонентом системи охолодження, незважаючи на те, що він захищає СРО від частинок накипу і корозії, особливо коли СРО заправляється водою з різних джерел. Накип на зовнішніх поверхнях гільзи циліндрів, порожнинах головки утворюється внаслідок хімічної корозії при заправці системи водою. Накип і іржа переносяться в порожнини трубок радіатора, що також знижує тепловіддачу від його поверхонь. ФОР уловлюють частинки забруднень в ОР, захищаючи СРО [6, 7]. За кордоном фільтри ОР встановлюються з 60-х років минулого століття на деякі моделі двигунів, що працюють у важких умовах експлуатації (кар'єрні самоскиди, магістральні тягачі, будівельно-дорожні машини тощо). В останні роки їх застосування розширюється і для інших автомобілів.

Видалення механічних забруднень з ОР зменшує зношування і корозію деталей, запобігає відкладенням на стінках каналів і сприяє ефективній передачі тепла від нагрітих поверхонь до рідини [9]. Питання фільтрації (очищення) ОР більш детально буде розглянуто далі. (У даній роботі використовуються 2

терміни – фільтрація і очищення. Однак слід зазначити, що вони не є тотожними. Фільтрація, за фізичною суттю, являє собою видалення забруднень при пропусканні текучих середовищ (гази, рідини) через пористі матеріали або сітки. Очищення – більш широкий термін, що має на увазі видалення забруднень з текучих середовищ будь-якими способами (гідродинамічними, електричними та ін.)

Охолоджуючі рідини. Еволюція ОР не завершилася переходом від простої природної води до етиленгліколевих рідин. Властивості ОР (антифризу) як «рідкого елемента» системи охолодження продовжують покращувати всі розробники та виробники антифризів [6,7,23].

Солі карбонових кислот як інгібітори корозії для охолоджувальних рідин вперше в світі почали використовувати в середині 90-х років XX століття.

Основним стимулом до пошуку принципово нових інгібіторів стало створення потужних високофорсованих двигунів, що працюють в умовах підвищених температур і значних теплових потоків. Традиційні антифризи з неорганічними інгібіторами корозії (фосфати, нітрати, нітрити, аміни, силікати, борати) не могли забезпечити надійний захист нових двигунів. Світовим виробникам охолоджувальних рідин доводилося враховувати і жорсткі норми екологічної безпеки.

Японські виробники першими в світі відмовилися від використання силікатів (метасилікату натрію) в охолоджуючих рідинах. Силікати є ефективними інгібіторами корозії, але у великих концентраціях здатні погіршувати тепловідвід за рахунок низької теплопровідності утвореної захисної плівки.

Технічні вимоги Американської асоціації з випробування матеріалів ASTM D4985 і нормативи концерну Volkswagen AG, розроблені для важкої техніки, не допускають присутність силікатів в охолоджуючих рідинах. У більшості американських ОЖ відсутні нітрит-нітратні інгібітори корозії. Ці сполуки чудово захищають деталі насосів від кавітаційної корозії, але у високих

концентраціях згубно діють на припій, а при взаємодії з амінами утворюють стійкі токсичні сполуки (нітрозаміни). Фосфатні інгібітори корозії були заборонені до використання в країнах ЄС, головним чином, на вимогу екологів. Було доведено, що фосфати, виділяючись в навколишнє середовище, призводять до посиленого росту бурих водоростей у водоймах, порушуючи баланс екосистеми. Обмеження вмісту фосфатів зменшує відкладення накипу в системі охолодження, покращує захист від кавітаційної ерозії та хімічної корозії, збільшує термін служби ущільнень рідинного насоса [30].

Оптимізація руху потоків ОР має особливе значення при створенні високоефективних СРО. При цьому важливим є складання карти розподілу потоків рідини в каналах охолодження двигуна, що дозволяє забезпечити інтенсивний рух рідини в зонах з високою тепловою напруженістю. У критичних зонах двигуна доцільне зниження діаметрів каналів до 10 мм з відповідним підвищенням швидкостей потоку ОР до 3...5 м/с (в інших зонах СРО швидкості потоку зазвичай не перевищують 1,5 м/с). Для інтенсифікації тепловідведення від нагрітих зон двигуна перспективним є використання штучно організованих закручених (вихрових) потоків ОР [1].

Теплові акумулятори (ТА) сприяють прискоренню прогріву двигуна при його холодних пусках і знаходять все більше застосування на сучасних автомобілях (зокрема, у складі гібридних силових установок). При пуску двигуна рідина з ТА, нагріта в період його попередньої роботи, прокачується насосом з електроприводом через канали системи охолодження двигуна. Це дозволяє швидко прогріти двигун і значно знизити викиди його токсичних компонентів в період прогріву [1].

Високоефективні інтелектуальні СРО. З огляду на вищесказане, можна зробити висновок, що розширення застосування електроніки на автомобільних двигунах в останні десятиліття докорінно змінює традиційні принципи функціонування і конструювання багатьох вузлів і агрегатів двигуна. Електроніка інтегрується в механічні вузли і дозволяє гнучко і комплексно

керувати різноманітними параметрами двигуна в залежності від режиму його роботи. Тому вже на початку 90-х років минулого століття з'явилися розробки СРО, що включають інтегровані елементи електронної автоматики. Подібні СРО отримали назву інтелектуальних (адаптивних) систем [11-14]. Особливостями перших варіантів подібних систем були підтримка в двигуні оптимальної температури ОР залежно від навантаження двигуна, термостатичне регулювання температури ОЖ, управління включенням вентилятора радіатора [3,4].

Концерн R.Bosch (Німеччина) розробив свою систему управління тепловим станом двигуна, яка отримала назву Termomanagement, в якій рідинний насос і вентилятор мають електропривод, а регулювання температури рідини здійснюється пропорційним клапаном з електронним управлінням і вбудованою діагностикою [8,12]. Таким чином досягається необхідний баланс між витратами рідини і повітря в СРО, що дозволяє знизити витрати потужності на привід насоса (в тому числі за рахунок його роботи в зоні максимального ККД) і вентилятора приблизно на 60...80 % [11].

Інноваційна система терморегулювання ITM, створена концерном Volkswagen AG, є одним із прикладів сучасної інтелектуальної системи рідинного охолодження двигунів. Дана система реалізована на автомобілі Volkswagen Touareg Hybrid, а також застосовується на двигуні 4,2 л V8 TDI і в повному обсязі реалізована на двигуні моделі CGRA 3,6 л V6 FSI (рис. 1.6). Вона дозволяє реалізувати гнучку схему холодного пуску, прогріву двигуна і коробки передач.

За рахунок цілеспрямованого управління тепловими потоками вона забезпечує більш швидкий вихід двигуна і коробки передач на найбільш економічні теплові режими, а також прискорює прогрів салону [3].

Аналогічні розробки ведуть і такі відомі фірми як Valeo, Delphi, Wahler, DANA Corporation та ін. [10,14,15].

Таким чином, розвиток автотранспортних поршневих двигунів пов'язаний з безперервним їх вдосконаленням для підвищення надійності, поліпшення

показників паливної економічності та токсичності. Висуваються все більш високі вимоги до окремих вузлів і агрегатів двигунів, в тому числі і до компонентів СРО, які, як видно з вищесказаного, помітно ускладнилися і вимагають високої якості та чистоти ОР, а також всієї системи охолодження в цілому.

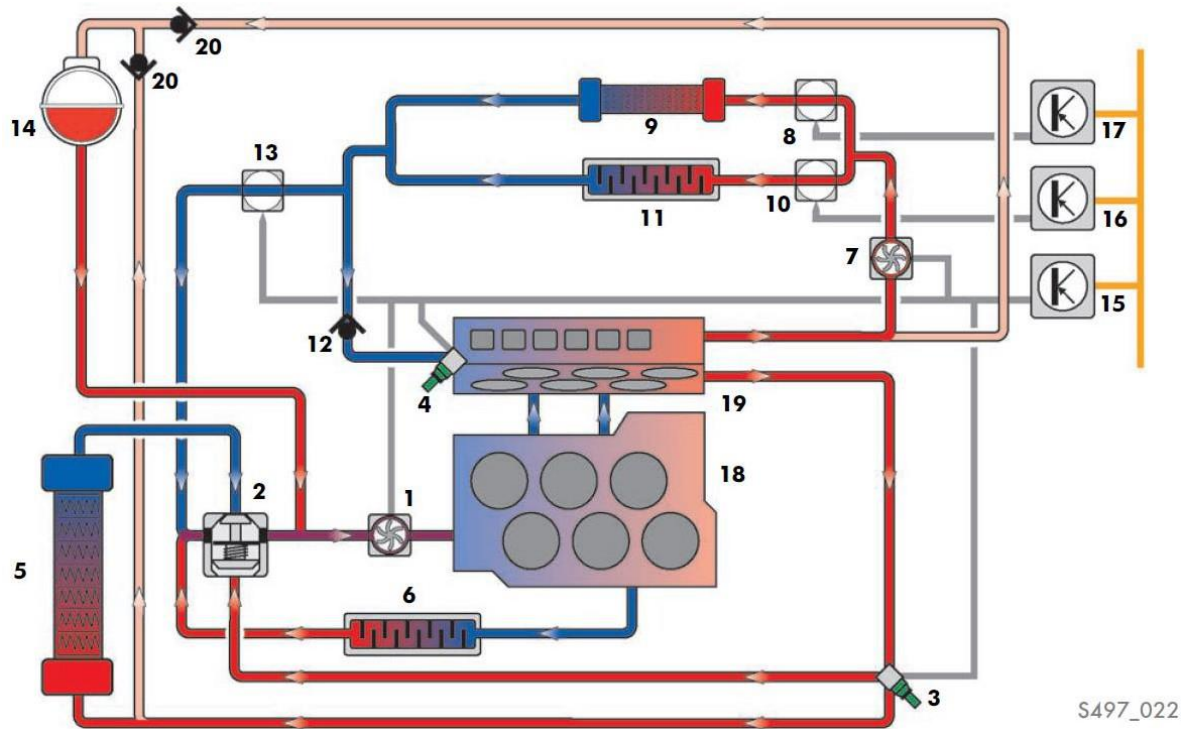


Рис. 1.6. Система терморегулювання на двигуні CGRA 3.6 л V6 FSI концерну Volkswagen AG [3]: 1 – відключається насос ОР і клапан регулювання; 2 – термостат; 3 – датчик температури ОР; 4 – датчик температури терморегулювання двигуна; 5 – основний радіатор системи охолодження; 6 – масляний радіатор двигуна; 7 – насос 2 циркуляції ОР; 8 – запірний клапан системи охолодження; 9 – теплообмінник обігрівача; 10 – відключаючий клапан теплообмінника масла АКП і клапан охолодження масла; 11 – теплообмінник масла АКП; 12 – зворотний клапан контуру ГБЦ; 13 – відключаючий клапан блоку циліндрів і клапан ОР блоку циліндрів; 14 – розширювальний бачок; 15 – блок управління ДВС; 16 – блок управління АКП; 17 – блок управління системою Climatronic; 18 – блок циліндрів; 19 – ГБЦ; 20 – зворотний клапан зворотної магістралі ОР.

На жаль, культура експлуатації поршневих двигунів у складі різних видів автотранспорту часто далека від необхідної, що призводить до різних відмов і несправностей окремих елементів і підсистем СРО двигунів [11-15].

1.2 Несправності в системах рідинного охолодження та їх вплив на роботу двигуна

Аналіз даних експлуатації автотранспортної техніки показує, що від 25 до 40 % несправностей і відмов двигунів припадає на систему рідинного охолодження (СРО) [1]. Найчастіше неполадки в СРО з'являються вже після 150...200 тис. км пробігу автомобіля (рис. 1.7) [2].

У тракторних двигунів і двигунів важких вантажних автомобілів (а також автобусів), які зазвичай працюють із навантаженням 70...90 %, через більш важкі умови експлуатації неполадки можуть виникнути вже після 500...700 годин роботи [2].

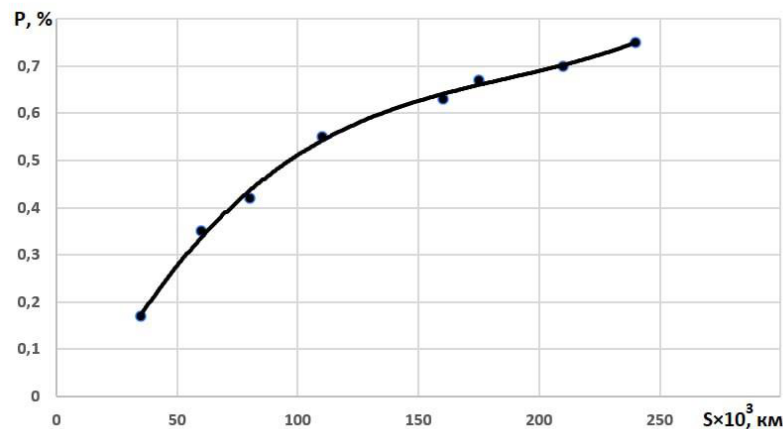


Рис. 1.7 Графік ймовірності (P) засмічення радіаторів системи охолодження залежно від пробігу (S) автомобіля.

До основних несправностей СРО належать різноманітні протікання, руйнування прокладок і сальників, збої у роботі термостатів і датчиків, закупорювання проточних каналів різних радіаторів, блоків і головок циліндрів.

В умовах експлуатації в СРО та її елементах відбуваються процеси кавітаційної ерозії та хімічної корозії, з'являються відкладення на

теплопередавальних поверхнях (накип), утворюються продукти розкладання антифризів. Усе це призводить до погіршення тепловіддачі від нагрітих деталей двигуна до СРО, що може викликати його перегрів і зниження енергетичних показників, а також суттєво підвищує ризик виходу двигуна з ладу [2].

У двигунах із великим робочим об'ємом (двигуни вантажних автомобілів, автобусів, спецтехніки тощо) з «мокрими» гільзами циліндрів, які безпосередньо контактують із охолоджувальною рідиною, кавітація гільз є однією з головних проблем, що впливає на строк служби двигуна [1]. Під час поперечних коливань гільзи, спричинених рухом поршня, у навколишній рідині виникають хвилі розрідження та стиску. Нагріта рідина постійно закипає і припиняє кипіти при зниженні та підвищенні тиску. Це провокує кавітаційну ерозію гільзи, що призводить до її руйнування (рис. 1.8). Руйнування гільз потребує проведення капітального ремонту двигуна.



Рис. 1.8. Кавітаційна ерозія гільзи двигуна [1].

Від кавітації також страждає крильчатка насоса системи охолодження – як у вантажних, так і в легкових автомобілях. У цьому випадку кавітація (утворення та «схлопування» бульбашок) виникає на периферії лопатей крильчатки внаслідок зменшення тиску при підвищенні швидкості. Ці бульбашки руйнують кромки лопатей, а в крайньому випадку і всю крильчатку (рис. 3). У результаті доводиться замінювати насос охолоджувальної рідини [1, 2].



Рис. 1.9. Кавітаційна ерозія та забруднення лопатей крильчатки рідинного насоса двигуна [2]

Корозійний шар (іржа) на стінках каналів двигуна та радіатора є теплоізолятором, оскільки має теплопровідність приблизно у 50 разів меншу, ніж метал (рис. 1.10) [2]. Виникає така причинно-наслідкова залежність: двигун гірше віддає тепло, радіатор гірше його приймає, двигун перегрівається, охолоджувальна рідина перегрівається, і відведення теплової енергії відбувається за підвищених температур [2].



Рис. 1.10. Корозійний шар на внутрішній поверхні блока двигуна та у внутрішній порожнині радіатора із засміченням каналів [2].

Засмічення прохідного перерізу трубок радіатора продуктами накипу та корозії призводить до підвищення температури охолоджувальної рідини і зрештою до перегріву двигуна з тяжкими наслідками [2].:

- поломка компресійних кілець поршнів;
- недопустимий прорив робочих газів у картер двигуна та швидка втрата антикорозійних і протизношувальних властивостей присадок у моторній оливі;
- зниження потужності двигуна;

- зміна зазорів у циліндро-поршневій групі і кривошипно-шатунному механізмі (КШМ) двигуна, що призводить до появи металевих стуків в двигуні, добре чутих під час його роботи на холостому ходу, підвищеної витрати моторної оливи, заклинювання та руйнування рухомих деталей двигуна.

При виявленні хоча б однієї з перелічених несправностей двигун необхідно негайно зупинити, а причину несправності – усунути [2].

Через продукти корозії (частинки іржі), що знаходяться в ОР можуть заклинити рухомі деталі термостата, порушитися герметичність сальника рідинного насоса, засмітитися радіатор або навіть канали блока двигуна. У крайньому випадку радіатор або головка блока циліндрів можуть зазнати пошкодження у вигляді наскрізної корозії [2].

Досить часто трапляються випадки, коли в систему охолодження внаслідок негерметичності прокладок потрапляє моторна олива. Масляна плівка осідає на стінках деталей системи охолодження та різко знижує їх теплопровідність. Такі відкладення призводять до перегріву двигуна в літній період, недостатнього обігріву салону автомобіля взимку, передчасного зношування ущільнювальних матеріалів, запізнення спрацьовування термостата, температурних датчиків тощо. У результаті спостерігається зниження ресурсу двигуна та збільшення кількості відмов [2].

Виходячи з викладеного, можна зробити висновок, що всі описані несправності, які виникають у системі рідинного охолодження, неминуче призводять до змін у роботі двигуна, погіршення його експлуатаційних характеристик і навіть до повного виходу його з ладу [2].

Проведений аналіз та узагальнення досвіду експлуатації й виконаних досліджень СРО автотранспортних двигунів дозволяють зробити однозначний висновок: практично всі несправності та відмови системи охолодження й її елементів спричинені виключно частинками забруднень, що циркулюють разом із антифризом у системі, а згодом перетворюються на відкладення на стінках теплопередавальних поверхонь і у проточних каналах системи [2].

Крім того, частинки забруднень підвищують імовірність виникнення кавітаційних явищ у СРО [1]. Тобто за наявності твердих частинок у ОР відбувається «самоприскорюваний» процес кавітації: чим більше частинок – тим інтенсивніше кавітація, а чим інтенсивніше кавітація тим більше утворюється твердих частинок унаслідок кавітаційної ерозії [2].

У зв'язку з викладеним можна констатувати, що наявність частинок забруднень різного походження в ОР є вкрай небажаною і може призвести до серйозних негативних наслідків для роботи двигуна [2].

1.3. Забруднення охолоджуючої рідини та їх джерела

Усі зазначені проблеми систем рідинного охолодження (СРО) під час експлуатації автотранспортних двигунів значною мірою зумовлені наявністю в охолоджувальній рідині (ОР) забруднень різного походження [3].

Використання абсолютно чистої охолоджувальної рідини в СРО автотранспортних двигунів практично неможливе, оскільки завжди існуватимуть технологічні та експлуатаційні умови, що сприяють утворенню забруднень [3].

Принципово можливі лише три шляхи появи забруднень в охолоджувальній рідині, відповідно до яких самі забруднення можна класифікувати на [3]:

- виробничо-технологічні;
- внутрішні експлуатаційні, що утворюються в системі рідинного охолодження під час роботи;
- зовнішні експлуатаційні, які потрапляють у систему рідинного охолодження ззовні в процесі роботи (табл. 1.1).

Перший тип забруднень – виробничо-технологічні – утворюється неминуче ще на етапі виготовлення двигуна. До них належать металева стружка та тирса, що виникають під час механічної обробки блока циліндрів і потрапляють у важкодоступні порожнини сорочки охолодження. У цих порожнинах можуть

також залишатися залишки формувального піску, що потрапили туди під час лиття блока. Через складну геометрію каналів сучасних систем охолодження повне видалення таких домішок є досить складним завданням [3].

Таблиця 1.1 – Джерела забруднень системи рідинного охолодження (СРО)

Джерела забруднень системи рідинного охолодження (СРО)		
виробничо-технологічні	експлуатаційні	
	внутрішні експлуатаційні	зовнішні експлуатаційні
1. Формувальний пісок	1. Продукти кавітаційної ерозії	1.Песок
2. Металева стружка та тирса	2. Продукти хімічної корозії	2. Частинки герметика
3. Окалина	3. Накип і відкладення	3.Фрагменти прокладок
4. Залишки мастильно-охолоджувальної рідини	4. Продукти розкладання антифризу	4. Залишки засобів герметизації

Під час виробництва двигунів здійснюється комплекс спеціальних технологічних заходів, спрямованих на ретельне очищення деталей і вузлів від залишків забруднень – стружки, окалини, бруду, формувального піску тощо. Для цього застосовують віброочищення блоків і головок циліндрів, миття з використанням поверхнево-активних речовин, продування каналів та порожнин стисненим повітрям та інші технологічні операції, які забезпечують максимальне видалення сторонніх частинок перед складанням двигуна [3].

Перший тип забруднень — виробничо-технологічні — утворюється неминуче ще на етапі виготовлення двигуна. До них належать металева стружка та тирса, що виникають під час механічної обробки блока циліндрів і потрапляють у важкодоступні порожнини сорочки охолодження. У цих порожнинах можуть також залишатися залишки формувального піску, що потрапили туди під час лиття блока. Через складну геометрію каналів сучасних систем охолодження повне видалення таких домішок є досить складним завданням [3].

Під час виробництва двигунів здійснюється комплекс спеціальних технологічних заходів, спрямованих на ретельне очищення деталей і вузлів від залишків забруднень – стружки, окалини, бруду, формувального піску тощо. Для цього застосовують віброочищення блоків і головок циліндрів, миття з використанням поверхнево-активних речовин, продування каналів та порожнин стисненим повітрям та інші технологічні операції, які забезпечують максимальне видалення сторонніх частинок перед складанням двигуна [3].

РОЗДІЛ 2

СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ФІЛЬТРА ОХОЛОДЖУЮЧОЇ РІДИНИ

2.2. Аналіз патентної інформації

Для оцінки рівня техніки в даній області був проведений інформаційний пошук по науково-технічній і патентній літературі. Всього по темі було відібрано близько 100 джерел, що відносяться до теми розробки. У число цих джерел входить близько 70 патентів, зареєстрованих в Україні, США, Японії, країнах Європейського Союзу. Розглянемо деякі з цих патентів. Варіант, пропонований фірмою Fram, на сьогоднішній день є найпоширенішою конструкцією фільтра для очищення ОР (рис. 2.1). Тут потік забрудненої рідини потрапляє у фільтр через входні отвори 9, розташовані по периферії корпусу 8, проходить через фільтруючий елемент 7, який і здійснює механічне очищення. Далі рідина потрапляє в центральну трубку 2, де вона взаємодіє з хімічними добавками 3, що знаходяться там у вигляді пасти. Ця паста розчиняється в рідині і захищає систему охолодження від корозії, кавітаційної ерозії, накипу, від зміни кислотно-лужного балансу в ОР.

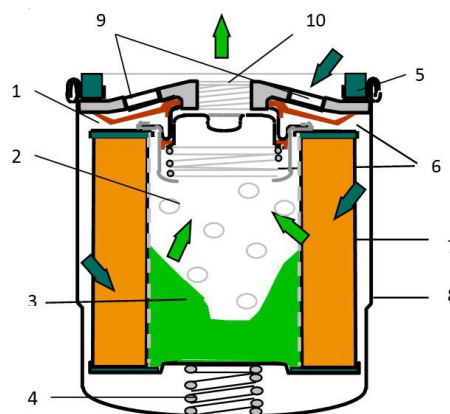


Рис. 2.1. Схема фільтра для очищення ОЖ (фірма Fram, США): 1 – металеві чашки; 2 – центральна трубка; 3 – хімічні добавки у вигляді розчинної пасти; 4 – утримуюча пружина; 5 – прокладки; 6 – антидренажний клапан; 7 – фільтруючий елемент; 8 – антикорозійний корпус.

Аналогічні конструкції фільтрів для очищення ОЖ, розроблені Du-Wayne E. Tich (США)] і George R. Sturmor (США), Long Manufacturing Ltd. (Канада), Allied-SignalInc., Baldwin FiltersInc., Donaldson Compa-ny Inc. та іншими фірмами.

Існують варіанти фільтрів із сітчастим фільтрувальним елементом. Різниця в конструкції полягає в принципі їх включення в контур СРО. Один із таких варіантів конструкції пристрою для очищення ОЖ, який пропонує J. G. Richardson, представлений на рис. 2.2 [9]. Цей фільтр вбудовується в трубопровід подачі ОЖ з сорочки двигуна в радіатор і складається з двох кришок з патрубками 1 і 2, прозорого вертикального корпусу 3 з сітчастим фільтром 4 і сполучною дрютяною рамкою 5 з гвинтовим притиском 10. Кришки і корпус мають циліндричну форму, їх стики ущільнені прокладками 7, а в стик корпусу з верхньою кришкою поміщена відбортована кромка чашоподібного сітчастого фільтра 6. На кришках передбачені патрубки для входу 8 і виходу 9 ОЖ.

Патрубки розташовані тангенціально відносно осі корпусу для забезпечення обертального руху ОЖ при проходженні через фільтр. П-подібна рамка з гвинтовим затискачем охоплює корпус фільтра.

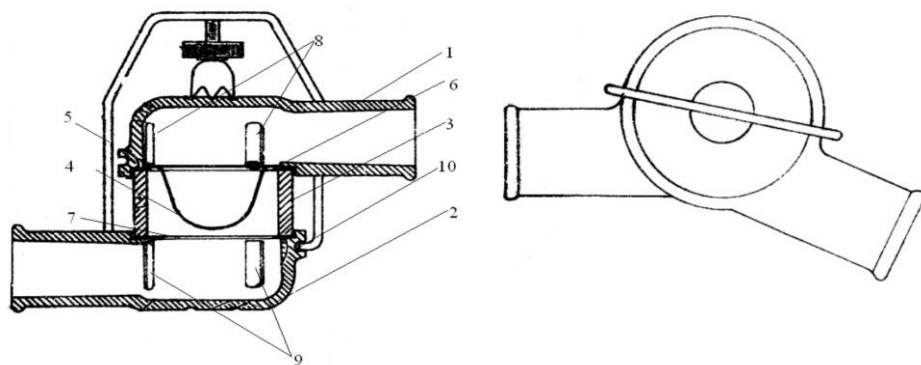


Рис. 2.2. Схема фільтра для очищення потоку рідини (патент Австралії № 67952/81): 1 – вхідний патрубок; 2 – вихідний патрубок; 3 – прозорий вертикальний корпус; 4 – чашоподібний сітчастий фільтр; 5 – сполучна П – образна дрютяна рамка; 6 – відбортована кромка чашоподібного сітчастого фільтра; 7 – прокладка; 8,9 – патрубки, що забезпечують обертальний рух рідини при проходженні через фільтр; 10 – гвинтовий притиск

Дещо інша конструкція фільтра для очищення ОР, заявлена фірмою Facet Interprises (США), представлена на рис. 2.3 [91].

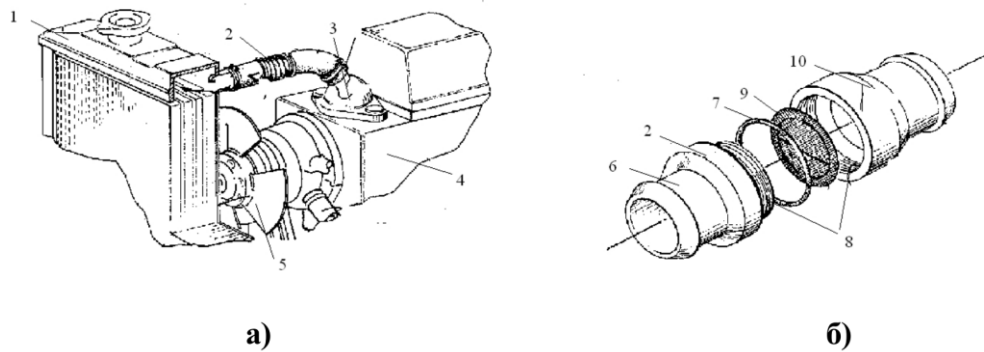


Рис. 2.3. Фільтр для очищення ОЖ фірми Facet Interprises (США) [9]: а) розташування фільтра на двигуні; б) поелементна конструкція фільтра; 1 – радіатор; 2 – корпус фільтра; 3 – термостат; 4 – блок циліндрів; 5 – вентилятор радіатора; 6 – вхідний патрубок; 7 – прокладка; 8 – різьбове з'єднання; 9 – фільтруючий елемент у вигляді сітки; 10 – вихідний патрубок.

Фільтр встановлюється між радіатором 1 і блоком циліндрів 4. На вході в блок циліндрів встановлений термостат 3. Потік рідини з радіатора 1 надходить в корпус фільтра 2 через вхідний патрубок 6, проходить через фільтруючий елемент, в якості якого використовується металева сітка, і, вже очищений, виходить з фільтра в блок циліндрів через вихідний патрубок 10. При роз'єднанні патрубків за допомогою різьбового з'єднання 8, відбувається заміна або очищення фільтруючого елемента.

Аналогічні фільтри розроблені Haseltine Lake&Co. (Франція) [9], Louis B. Johnson (США) [9], Theodore C. Geermans (Австралія) [4], John P. Hurst (США) [5] та іншими фірмами.

Наступний різновид конструкції фільтра для очищення рідини – із застосуванням магнітних матеріалів. Пропонований фільтр David F. McCready, (США) [9], представлений на рис. 2.4. У розглянутому фільтрі встановлена магнітна смужка 6, яка має магнітні частинки 7.

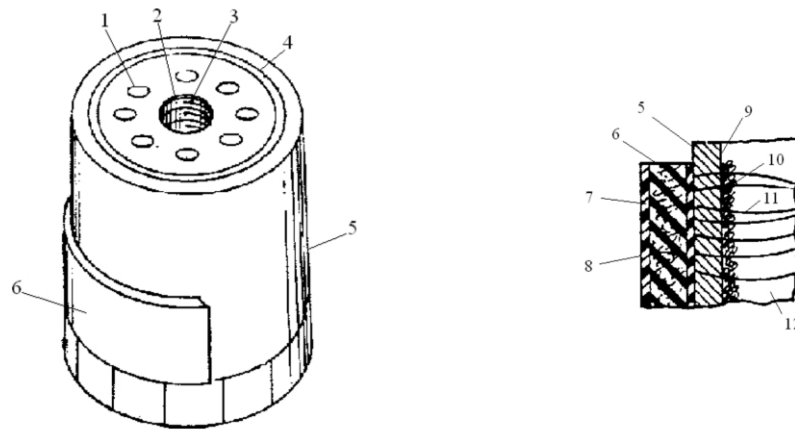


Рис. 2.4. Схема фільтра для очищення рідини (патент США № 5 078 870 [96]): 1 – вхідні отвори, розташовані по периферії; 2 – вхідний отвір, розташований по центру; 3 – з'єднувальні нитки; 4 – ущільнювальне кільце; 5 – циліндричний корпус; 6 – магнітна смуга; 7 – магнітні частинки; 8 – магнітний шар; 9 – внутрішня поверхня циліндричного корпусу; 10 – металеві частинки забруднень; 11 – магнітні лінії; 12 – внутрішня порожнина фільтра.

Магнітне поле певної напруженості постійного магніту забезпечує утримання металевих частинок забруднень 10 на внутрішній поверхні корпусу 9.

Інша конструкція фільтра для очищення рідини, представлена на рис. 2.5 (власник патенту – Allied Signal Inc., США) [7]. Рідина через вхідний патрубок 2 надходить у корпус фільтра 1. На вході в корпус виконані перегородки 4, 7 і 8 для забезпечення руху потоку в потрібному напрямку. Далі рідина проходить через очисні екрани 6, які вловлюють частинки забруднень. Між очисними екранами 6 виконана пластина 9, яка не дозволяє всьому об'єму потоку відразу пройти через екрани, і, тому частина потоку направляється до магнітного елементу 5, який притягує металеві частинки забруднень. Стійки 10 потрібні для того, щоб дозволити рідині повністю охопити магнітний елемент 5. І далі, вже очищена рідина, минаючи екрани 6, виходить з корпусу фільтра через патрубок 3.

Варіант фільтра для очищення ОЖ представлений фірмою Yuanhui Zang, (США) і показаний на рис. 2.6 [9]. У даній конструкції використаний принцип сепарації частинок під дією відцентрових сил, викликаних закручуванням потоку рідини.

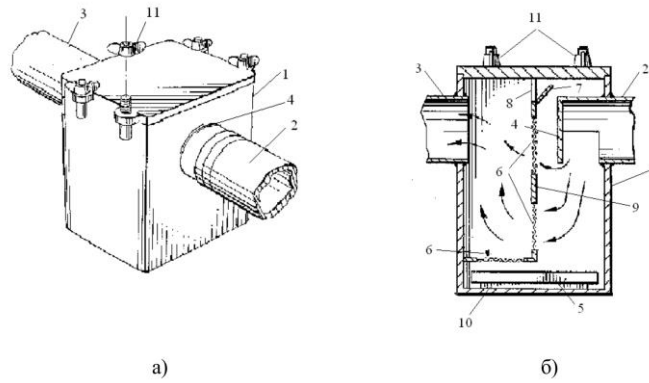


Рис. 2.5. Схема фільтра для очищення рідини фірми Allied Signal Inc., США [9]: а) зовнішній вигляд фільтра; б) розріз фільтра; 1 – корпус фільтра; 2 – вхідний патрубок; 3 – вихідний патрубок; 4,7,8 – перегородки; 5 – магнітний елемент; 6 – очисні екрани; 9 – пластина фільтра; 10 – стійки, що підтримують магнітний елемент; 11 – болти, що забезпечують герметизацію фільтра.

Фільтр містить циліндричний корпус 1 з послідовно встановленими в ньому вхідним 2 патрубком для осьового підведення рідини, нерухомим закручувальним апаратом 4, виконаним у вигляді багатолопатевої крильчатки, і на деякій відстані від нього вихідним патрубком 5, частина якого розташована всередині циліндричного корпусу. У нижній частині циліндричного корпусу в його стінці виконаний канал відведення твердих частинок забруднень 8 в грязьозбірник 6.

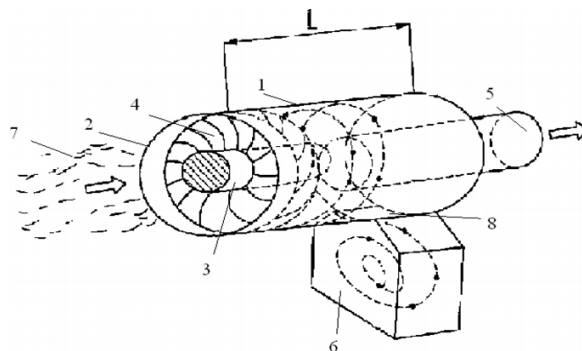


Рис. 2.6. Схема фільтра для очищення рідини за патентом США [9]: 1 – циліндричний корпус; 2 – вхідний патрубок; 3 – внутрішній циліндричний корпус; 4 – нерухомий лопатевий закручувальний апарат; 5 – вихідний патрубок; 6 – грязьозбірник; 7 – потік забрудненої рідини; 8 – щілина для відведення твердих частинок забруднень з потоку рідини

Інший пристрій для очищення потоку ОЖ представлений на рис. 2.7. Заявник – Michel E. Klein, (США) [9].

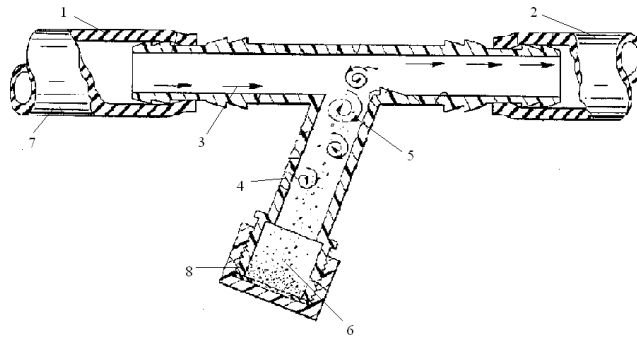


Рис. 2.7. Пристрій для очищення потоку рідини (патент США № 4 949 682) [9]: 1 – вхідний патрубок; 2 – вихідний патрубок; 3 – потік рідини; 4 – похила трубка для відділення частинок забруднень; 5 – закручується потік рідини; 6 – грязьозбірник; 7 – корпус пристрою; 8 – різьбове з'єднання для видалення забруднень.

Потік рідини через вхідний отвір 2 потрапляє в корпус пристрою 7. В області розташування похилої трубки 4 в потоці утворюються мікрровири, разом з якими закручуються і частинки забруднень, які направляються низ по похилій трубці в грязьозбірник 6. Очищена рідина направляється далі через вихідний патрубок 2 в систему охолодження. Видалення частинок забруднень з грязьозбірника 6 здійснюється при відкручуванні різьбової пробки 8. Існують схожі з вищевказаною конструкцією фільтри-сепаратори, де очищення здійснюється під дією сил тяжіння частинок через спеціальний сепаратор. Наприклад, фільтр-сепаратор, запропонований Earl J. Stearnce (США) [10], Jason H. Anderson (США) [11] (рис. 2.8) та ін.

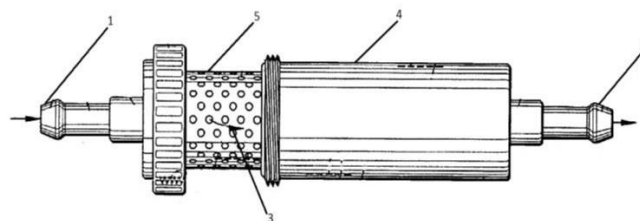


Рис. 2.8 Пристрій для очищення потоку ОЖ (патент США № 20080083669) [10]: 1 – вхідний патрубок; 2 – вихідний патрубок; 3 – потік рідини; 4 – грязьозбірник (корпус пристрою); 5 – сепаратор.

Існує ще ряд конструкцій, в яких фільтр ОЖ виконаний в єдиному корпусі з іншим вузлом системи охолодження. Яскравим прикладом є термостат з фільтруючим елементом, запропонований Jarry P. Harkey (США). Тут, в конструкцію класичного термостата додана металева сітка, що затримує забруднення на вході в термостат (рис. 2.9) [102].

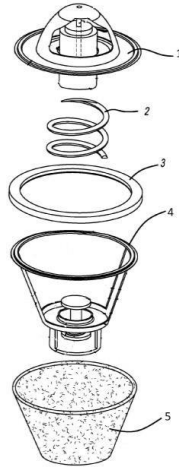


Рис. 2.9. Термостат з сітчастим фільтруючим елементом (патент США № 201600177809) [12]: 1 – термостат; 2 – упорна пружина; 3 – ущільнювальне кільце; 4 – корпус пристрою; 5 – сітчастий фільтруючий елемент.

Ще одним подібним прикладом є конструкція, запропонована Hu-dac Fluidtechnic GmbH (Німеччина) [3]. У даному варіанті фільтруючий елемент інтегрований в корпус радіатора охолодження двигуна (рис. 2.10).

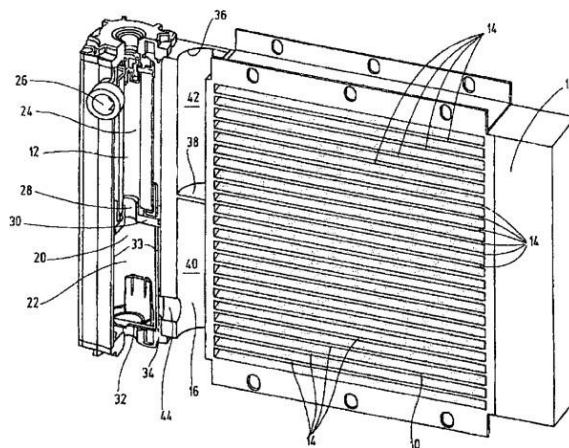


Рис. 2.10. Радіатор з фільтрувальним елементом (патент США № 008701434) [13], де 26 – вхідний патрубок; 32 – вихідний патрубок; 14 – пластини радіатора; 18 – корпус радіатора; 12 – фільтруючий елемент.

2.2. Формування вимог до перспективного фільтра охолоджуючої рідини

Розроблюваний фільтр ОЖ для автотранспортних двигунів призначений для очищення ОЖ, що циркулює в системі охолодження двигуна, від механічних домішок (піску, частинок металу, продуктів хімічної корозії та кавітаційної ерозії металів, накипу, залишків герметиків, фрагментів зруйнованих прокладок тощо) і продуктів розкладання антифризів (див. 1 розділ).

Основні вимоги до перспективного фільтра ОР можна сформулювати наступним чином.

1. Фільтр (пристрій очищення) повинен бути багаторазовим, з можливістю періодичного очищення грязезбірника. Це є економічно доцільним, а також екологічно раціональним рішенням, що дозволяє істотно спростити питання утилізації використаних автокомпонентів.

. Конструктивно фільтр повинен складатися з вхідного і вихідного патрубків для під'єднання до шлангів системи охолодження, корпусу, в якому здійснюється фільтрація, і ємності для збору затриманих забруднень. Така конструкція дозволить встановлювати даний фільтр без значних змін в системах охолодження на двигуни, пристрій і компоновання яких не передбачає монтаж зарубіжних ФОЖ типу spin-on.

3. Номінальна тонкість фільтрації (очищення) для твердих частинок забруднень (95% уловлювання) не повинна бути гіршою за 100 мкм при номінальній витраті ОР. Крім вищезазначених забруднень, фільтр повинен уловлювати різні гелеподібні продукти (результат розкладання антифризів).

4. Ефективність очищення не повинна істотно залежати від орієнтації фільтра в просторі.

5. Гідравлічний опір фільтра (перепад тиску на фільтрі) не повинен перевищувати встановленої величини, що визначається залежно від типорозміру фільтра при номінальній витраті ОР (уточнюється в процесі розробки для

кожного типорозміру). При установці фільтра витрата ОР в системі не повинна знижуватися більш ніж на 15%. Дана вимога по гідравлічному опору перспективного ФОР повинна бути взаємоузгоджена з значеннями гідравлічного опору інших компонентів СРО (термостатів радіаторів та ін.), оскільки повинна забезпечуватися гідравлічна сумісність ФОР з системою охолодження в цілому.

6. У процесі експлуатації при уловлюванні забруднень гідравлічний опір фільтра не повинен змінюватися в порівнянні з початковою нормованою величиною.

7. Фільтр повинен виключати перекриття потоку ОР в системі, навіть при повному заповненні брудозбірника частинками забруднень.

8. У конструкції фільтра (пристрою очищення) повинні бути відсутні рухомі елементи і дорогі матеріали (компоненти).

9. Фільтр (пристрій очищення) повинен мати грязеємність, що забезпечує термін його експлуатації без розкриття не менше 2-х років (або 50 тис. км пробігу транспортного засобу або 1500 мотогодин його роботи). Загальний термін служби фільтра повинен бути приблизно рівним ресурсу двигуна (терміну служби автомобіля). Зазначені терміни пояснюються інтервалами технічного обслуговування автомобілів, встановленими заводами-виробниками, і термінами служби антифризів, які встановлює їх виробник.

10. Фільтр (пристрій очищення) повинен виконувати свої функції в діапазоні температур – 40 ... +115°C (короткочасно – при температурах до +135 °C) в середовищі антифризу (будь-яких марок) при робочих витратах потоку до 100 л/хв (діапазон витрат уточнюється в процесі розробки для різних типорозмірів фільтрів). Зазначені значення температур досягаються в сучасних СЖО двигунів і нормуються виробниками радіаторів, термостатів та інших вузлів СРО [5].

11. Масогабаритні параметри фільтра і його конструкція повинні забезпечувати його легкий монтаж в підкапотному просторі автомобіля

(трактора) р «розриві» між гумовими патрубками системи охолодження. Місце монтажу фільтра повинно бути обрано з умови гідравлічної сумісності з СРО.

12. Фільтр (пристрій очищення) повинен зберігати герметичність при випробуванні надлишковим статичним тиском не менше 150 ± 10 кПа. Зазначене значення тиску може досягатися в СРО автомобільних двигунів. Статичним тиском подібної величини випробовуються автомобільні термостати і радіатори.

Розробка повинна вестися з урахуванням технічно і економічно обґрунтованої уніфікації, стандартизації та взаємозамінності використовуваних деталей і вузлів.

2.3. Розробка перспективної конструкції фільтра охолоджуючої рідини

На основі сформульованих вимог і результатів критичного аналізу патентної та науково-технічної літератури було запропоновано власні варіанти фільтрів-сепараторів оригінальної конструкції (рис. 2.11) [1].

Пристрій для очищення потоку рідини від твердих частинок забруднень працює таким чином. Потік рідини, що містить тверді частинки забруднень, надходить у пристрій через вхідний патрубок 4 і після проходження через закручувальний апарат 6 набуває обертового руху, який розвивається далі під час руху потоку в циліндричному корпусі 1. Закручений потік у циліндричному корпусі 1 має різну окружну швидкість – високу на периферії (поблизу стінки) та низьку в центральній зоні. Завдяки дії відцентрових сил у закрученому потоці тверді частинки відкидаються на внутрішню поверхню стінки циліндричного корпуса 1 і в процесі закрученого руху потоку проходять через щілини 7 у порожнину брудозбірника 8. Вихід потоку рідини, очищеного від твердих частинок забруднень, здійснюється через центральну частину циліндричного корпуса 1 у вихідний патрубок 5 [1].

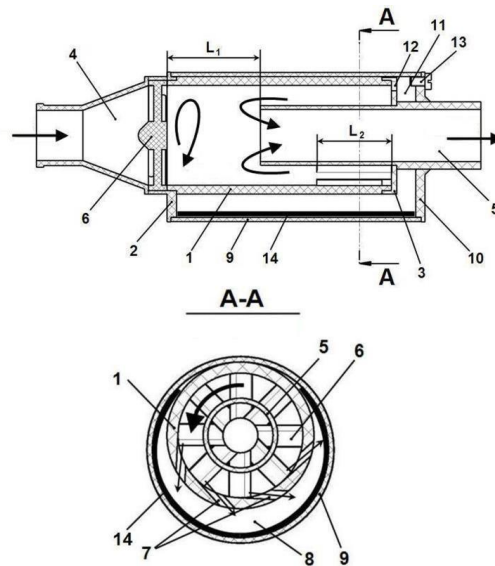


Рис. 2.11. Пристрій для очищення охолоджувальної рідини: 1 – циліндричний корпус; 2, 3 – торцеві стінки, виконані у вигляді фланців; 4 – вхідний патрубок; 5 – вихідний патрубок; 6 – закручувальний апарат; 7 – щілини для відведення частинок забруднень; 8 – грязезбірник; 9 – циліндричний кожух; 10 – додатковий фланець; 11 – кільцева камера; 12 – дренажний отвір; 13 – різьбова пробка; 14 – вставка у формі тонкого листа з магнітопластику [1].

Пристрій для очищення потоку охолоджувальної рідини від твердих частинок забруднень монтується в розрив гумового патрубку системи охолодження між двигуном і радіатором у горизонтальному положенні. Конструкція може бути як розбірною, так і нерозбірною. У разі нерозбірного виконання пристрій розраховується на певний термін експлуатації, після чого його вилучають із системи та утилізують (рис. 2.12) [1].



Рис. 2.12. Зовнішній вигляд макетного зразка пристрою для очищення охолоджувальної рідини [1].

Запропонований фільтр-сепаратор має таку конструкцію (рис. 2.13). Пристрій для очищення потоку охолоджувальної рідини від твердих частинок забруднень працює таким чином. Потік охолоджувальної рідини, що містить тверді частинки забруднень, надходить у циліндричний корпус 1 пристрою через вхідний тангенціальний патрубок 2 і завдяки тангенційному розташуванню патрубку 2 набуває обертального руху всередині циліндричної камери 1. Закручений потік охолоджувальної рідини в циліндричному корпусі 1 має різну колову швидкість — високу на периферії (поблизу стінки) і низьку у центральній зоні. При цьому потік рухається по гвинтовій траєкторії до вихрової камери 4 [1].

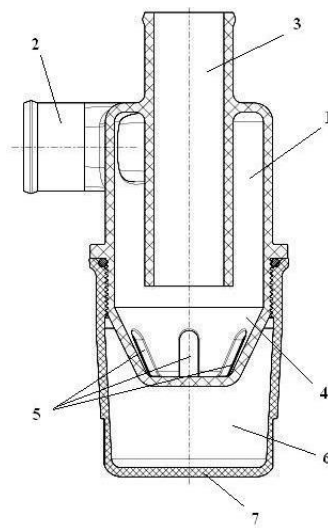


Рис. 2.13. Конструкція гідроциклонного пристрою для очищення охолоджувальної рідини поршневих двигунів від твердих частинок забруднень: 1 – циліндричний корпус; 2 і 3 – вхідний та вихідний патрубки; 4 – вихрова камера; 5 – уловлювальні отвори; 6 – грязезбірник; 7 – корпус грязезбірника [1].

Завдяки дії відцентрових сил у закрученому потоці тверді частинки забруднень відкидаються на внутрішню поверхню стінки циліндричного корпусу 1 і далі надходять у вихрову камеру 4. Унаслідок подальшого й інтенсифікованого закручування потоку у вихровій камері 4 відбувається відцентрове відкидання твердих частинок забруднень на внутрішню поверхню стінки вихрової камери 4, у якій виконано уловлювальні отвори 5. Під дією відцентрових сил тверді частинки, густина яких більша, ніж густина рідини, проходять через уловлювальні отвори 5 і надходять із порожнини вихрової

камери в порожнину грязезбірника 6, де накопичуються під час експлуатації пристрою [1].

Вихід потоку охолоджувальної рідини, очищеної від твердих частинок забруднень, здійснюється через вихідний осьовий патрубок 3 завдяки зворотному закрученому центральному потоку рідини всередині циліндричного корпусу 1. Далі очищена охолоджувальна рідина надходить у магістраль системи охолодження двигуна (на рис. 3 не показано), у яку вбудовано пристрій [1].

На практиці запропонований пристрій може бути розміщений між двигуном і його радіатором – у розриві між гумовими патрубками системи охолодження. За своїми технічними характеристиками та масогабаритними показниками він є найбільш придатним для використання у складі поршневих двигунів автомобілів, автобусів, тракторів різного призначення, будівельно-дорожніх і лісотехнічних машин, військової техніки, суден, тепловозів тощо.

Пристрій може працювати як у вертикальному положенні його поздовжньої осі, так і в нахиленому (при відхиленні до 30° від вертикалі) [1].

Дане технічне рішення має низку переваг: простоту, технологічність, компактність конструкції, ефективність, надійність і невеликий гідравлічний опір [1].

Запропоноване розташування уловлювальних отворів безпосередньо у стінці вихрової камери та охоплення цієї камери верхньою частиною корпусу грязезбірника дають змогу раціонально використовувати об'єм пристрою, підвищуючи його компактність, зменшуючи масу та спрощуючи конструкцію, а також збільшити ефективність сепарації твердих частинок забруднень із потоку охолоджувальної рідини [1].

Виконання уловлювальних отворів безпосередньо у стінці вихрової камери дозволяє звільнити простір у циліндричному корпусі та вихровій камері, що в свою чергу знижує гідравлічний опір пристрою [1].

Ємність грязезбірника при цьому може змінюватися у досить широких межах, залежно від особливостей поршневого двигуна (ємності його системи

охолодження), умов експлуатації пристрою для очищення охолоджувальної рідини та вимог, що до нього пред'являються (рис. 2.14) [1].



а



б

Рис. 2.14. Зовнішній вигляд розробленого гідроциклонного фільтра-сепаратора: а – макетний зразок; б – тривимірна модель для розрахунку [1].

Результати попередніх досліджень практичного застосування двох описаних конструкцій показали, що більш переважною (за критеріями складності та технологічності конструкції, масогабаритними показниками, можливістю компонування пристрою на транспортних засобах тощо) є друга конструкція – гідроциклонного фільтра-сепаратора. Вона відрізняється простотою та технологічністю, відсутністю спеціальної крильчатки для закручування потоку, невеликими габаритами у горизонтальній площині та низькою вартістю [1].

Таким чином, можна вважати, що знайдене технічне рішення може бути успішно застосоване в системах охолодження сучасних двигунів за умови відпрацювання на основі досліджень усіх конструктивних параметрів такого гідроциклонного фільтра-сепаратора [1].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРІВ ОХОЛОДЖУЮЧОЇ РІДИНИ

3.1. Лабораторна установка для проведення досліджень і обладнання

Розроблена і виготовлена лабораторна установка (рис. 3.1) дозволяє моделювати різні гідравлічні режими роботи СРО (зміна навантаження і частоти обертання вала двигуна). Вона виділяє гідравлічні процеси роботи СРО, не зачіпаючи особливості тепловиділення в двигуні, які залежать від характеру протікання робочого процесу на різних режимах. Це дає можливість розглядати роботи СРО, не зачіпаючи особливості тепловиділення в двигуні, які залежать від характеру протікання робочого процесу на різних режимах. Це дає можливість розглядати функціонування гідравлічного тракту СРО в «чистому» вигляді, забезпечуючи високу повторюваність результатів експериментів.

Схема лабораторної установки представлена на рис. 3.1а, а її зовнішній вигляд – на рис. 3.1 б. Конфігурація гідравлічної частини стенду в цілому повторює конфігурацію типової СРО автомобільного двигуна (але без радіатора). У складі установки використовується стандартний відцентровий насос з електроприводом фірми Bosch, що застосовується як допоміжний для прокачування ОР через гідравлічний контур салону реального автобуса.

Насос приводиться у дію від вбудованого електродвигуна постійного струму з номінальною напругою 24 В і забезпечує частоту обертання валу насоса 3900 хв^{-1} при споживаному струмі 3,6 А (потужність насоса 86 Вт). При цьому плавним регулюванням напруги живлення електродвигуна насоса досягається регулювання витрати рідини в діапазоні від 0 до 90 л/хв.

Для вимірювання витрати рідини в гідравлічному контурі установки використовувався ультразвуковий витратомір US-800 (рис. 3.2). Діапазон вимірювання витрати у цього витратоміра вимірювача – 8...440 л/хв. Похибка вимірювання витрати за паспортними даними становить $\pm 1,0 \%$.

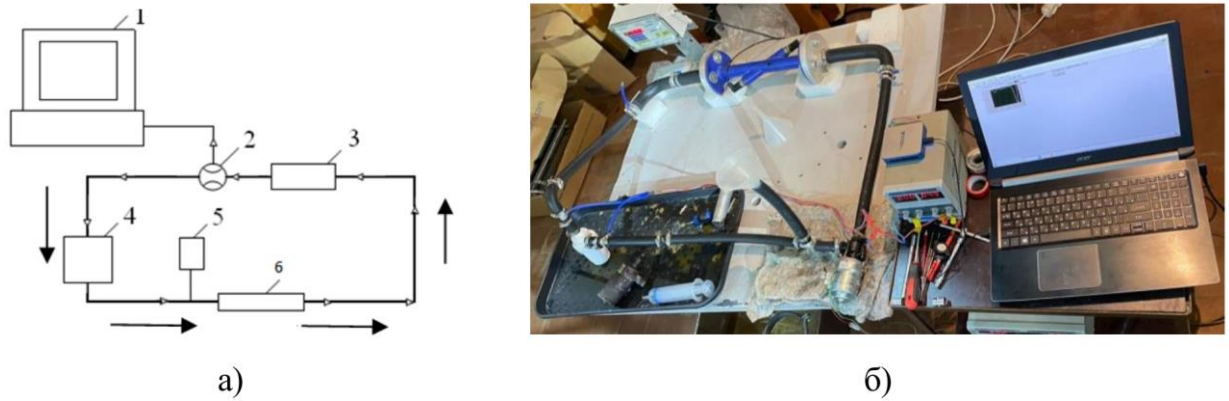


Рис. 3.1. Схема (а) і зовнішній вигляд (б) лабораторної моделюючої установки для дослідження роботи фільтрів: 1 – персональний комп'ютер; 2 – витратомір; 3 – фільтр для ОР; 4 – насос; 5 – пристрій для введення частинок забруднень; 6 – прозора трубка.



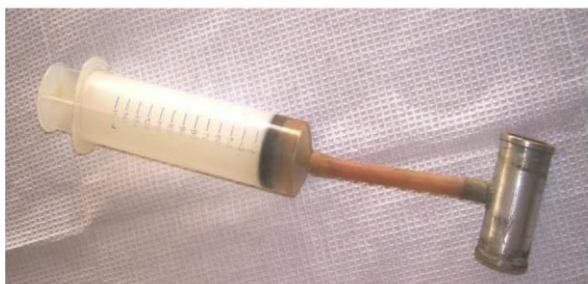
Рис. 3.2. Ультразвуковий витратомір US-800.

Під час проведення вимірювань витратомір підключався до гідравлічного контуру лабораторної установки. В якості робочої рідини на лабораторному стенді використовувалася звичайна вода з щільністю 1000 кг/м^3 .

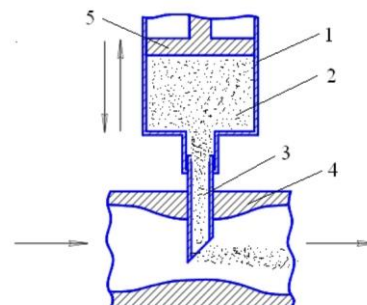
Для штучного введення частинок забруднень застосовувався спеціальний пристрій, що складався з циліндра з поршнем і гумової трубки, що з'єднувала порожнину циліндра з ділянкою трубопроводу (рис. 3.3).

Тестові частинки попередньо поміщалися всередину пристрою і потім в певний момент подавалися вручну поршнем в магістраль системи. При цьому в циліндрі пристрою практично знаходилася суміш частинок забруднень і води, що дозволяло легко вводити забруднення в потік.

Для заповнення системи рідиною в контур встановлена пластмасова лабораторна воронка. Крім описаних компонентів, лабораторна установка включає в себе: скляну трубку для спостереження за характером руху потоку рідини і відбірники тиску.



а)



б)

Рис. 3.3. Зовнішній вигляд поршневого пристрою (а) і схема введення забруднень (б) в потік: 1 – корпус; 2 – частинки забруднень; 3 – канал введення частинок; 4 – ділянка трубопроводу; 5 – поршень.

Для вимірювання перепаду тиску між входом і виходом досліджуваного фільтра використовувалися диференціальні напівпровідникові датчики тиску фірми Honeywell (США) декількох типів (MPX5010DP, MPX5050DP - для різних діапазонів вимірювань). Застосовувані датчики мають малі габарити і високі метрологічні характеристики, що забезпечують похибку визначення тиску (перепаду тиску) не гірше $\pm 0,5\%$ від верхньої межі вимірювань.

Для розділення частинок забруднень (отриманих в експлуатації) на фракції використовувався комплект лабораторних сит (7 штук).

При проведенні дослідження зарубіжних зразків ФОЖ вони встановлювалися на спеціальній стійці (рис 3.5б) за допомогою монтажного пристрою (рис. 3.4), або безпосередньо в розріз патрубків, що закріплюються стяжними хомутами.

Принципова схема технологічного пристрою, що дозволяє досліджувати неповнопоточні фільтри типу spin-on, такі як Fleetguard, HENGST, Donaldson тощо, показана на рис. 3.4.

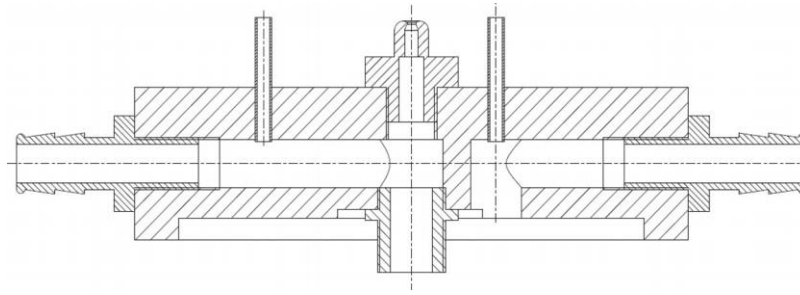
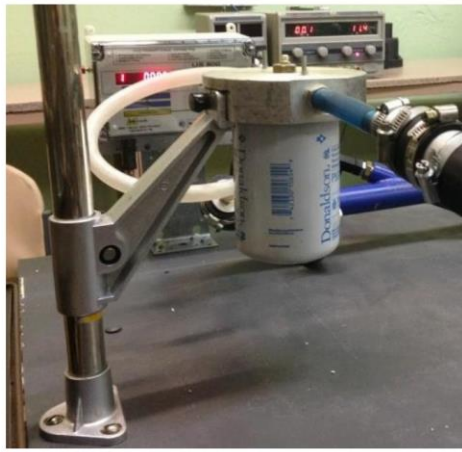


Рис. 3.4. Принципова схема технологічного пристрою для проведення випробувань зарубіжних фільтрів типу *spin-on*.



а)



б)



в)

Рис. 3.5. Різні ФОР у складі лабораторної установки: а) – розроблений макетний зразок ГФС; б) – неповнопоточний фільтр Donaldson типу *spin-on*; в) – фільтр фірми Valeo

При визначенні ефективності фільтра з використанням однопрохідної схеми проходження тестових частинок через фільтр (описано далі) в гідравлічний контур лабораторної установки додається ресивер зі спеціальним технологічним фільтром.

3.2. Результати досліджень зарубіжних зразків фільтрів охолоджуючої рідини

Оцінити фільтруючу здатність зарубіжних зразків неповнопоточних фільтрів типу *spin-on* (Fleetguard, Donaldson, Baldwin та ін.) досить важко, оскільки на практиці такі фільтри встановлюються в байпасний канал

(паралельно основній магістралі в СРО) і точно врахувати кількість забруднень, що потрапляють у фільтр через цей канал, досить складно. Тому даний показник функціонування зарубіжних фільтрів у даній роботі не оцінювався.

У зв'язку з тим, що фільтри подібної конструкції мають фільтруючий елемент, а також дроселюючий отвір на виході з фільтра, в лабораторних умовах визначалися такі характеристики фільтра, як опір потоку рідини, що проходить через нього, і пропускна здатність фільтра (рис. 3.6).

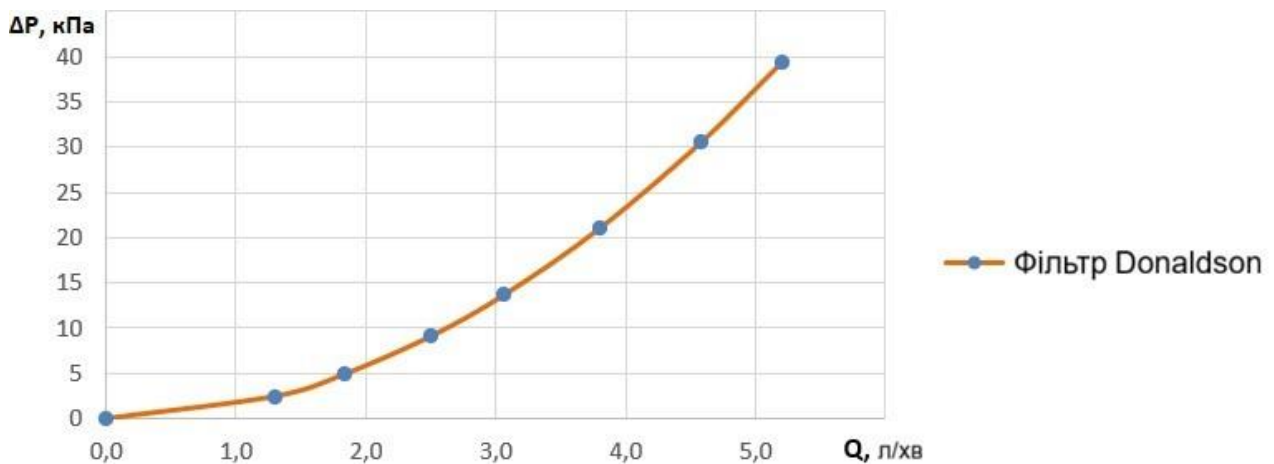


Рис. 3.6. Залежність перепаду тиску ΔP між входом і виходом фільтра типу *spin-on* компанії Donaldson від величини витрати рідини Q

Аналіз характеристики гідравлічного опору (рис. 3.6) дозволяє зробити висновок, що через неповнопоточний фільтр типу *spin-on* проходить досить невелика частина рідини – близько 5 л/хв. При цьому опір фільтра є досить значним і становить більше 35 кПа при витраті 5 л/хв.

На основі цих результатів можна обґрунтовано зробити висновок, що через подібні фільтри проходить набагато менша кількість рідини, ніж 10% від основного потоку ОР, як вказують зарубіжні виробники таких фільтрів. Цим підтверджується висновок про те, що неповнопоточні нерозбірні фільтри типу *spin-on* служать не стільки для очищення ОР, скільки для зберігання і введення в потік антифризу хімічних присадок, про що говорилося в розділах 1 і 2.

Крім цього, при лабораторних дослідженнях проводилося вивчення гідравлічних характеристик вищеописаного сітчастого фільтра фірми *Valeo*. На

рис. 3.7 наведена залежність перепаду тиску ΔP між входом і виходом фільтра (гідравлічний опір) від величини витрати рідини Q .

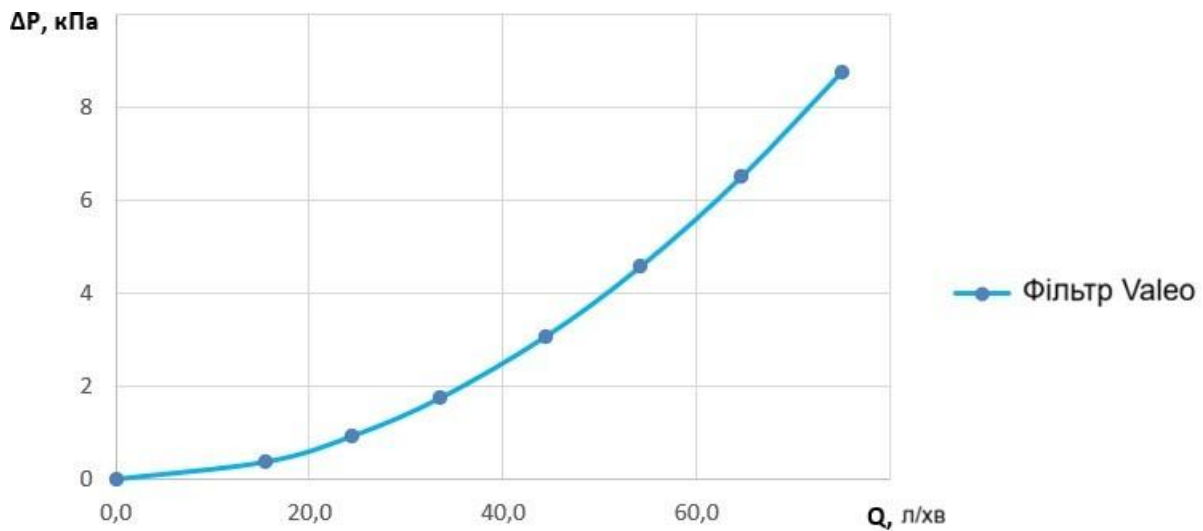


Рис. 3.7. Залежність перепаду тиску ΔP між входом і виходом фільтра фірми *Valeo* від величини витрати рідини Q .

Наведений на рис. 3.7 графік гідравлічного опору ФОР фірми *Valeo* показує, що цей фільтр має відносно невисокий гідравлічний опір до витрат рідини 75 л/хв. Однак при цьому слід враховувати, що ці дані отримані з чистою сіткою фільтра. У процесі реальної експлуатації гідравлічний опір фільтра буде збільшуватися в міру засмічення сітки частинками забруднень.

3.3. Результати досліджень розробленого гідроциклонного фільтра-сепаратора та їх порівняння із зарубіжними аналогами

В результаті лабораторних випробувань була отримана залежність, що оцінює ефективність лабораторних зразків гідроциклонних фільтрів-сепараторів різних конструкцій. На рис. 3.8-3.10 наведено залежності коефіцієнтів очищення від розміру (умовного діаметра) тестових частинок при різних витратах робочої рідини для декількох варіантів конструкцій ГФС.

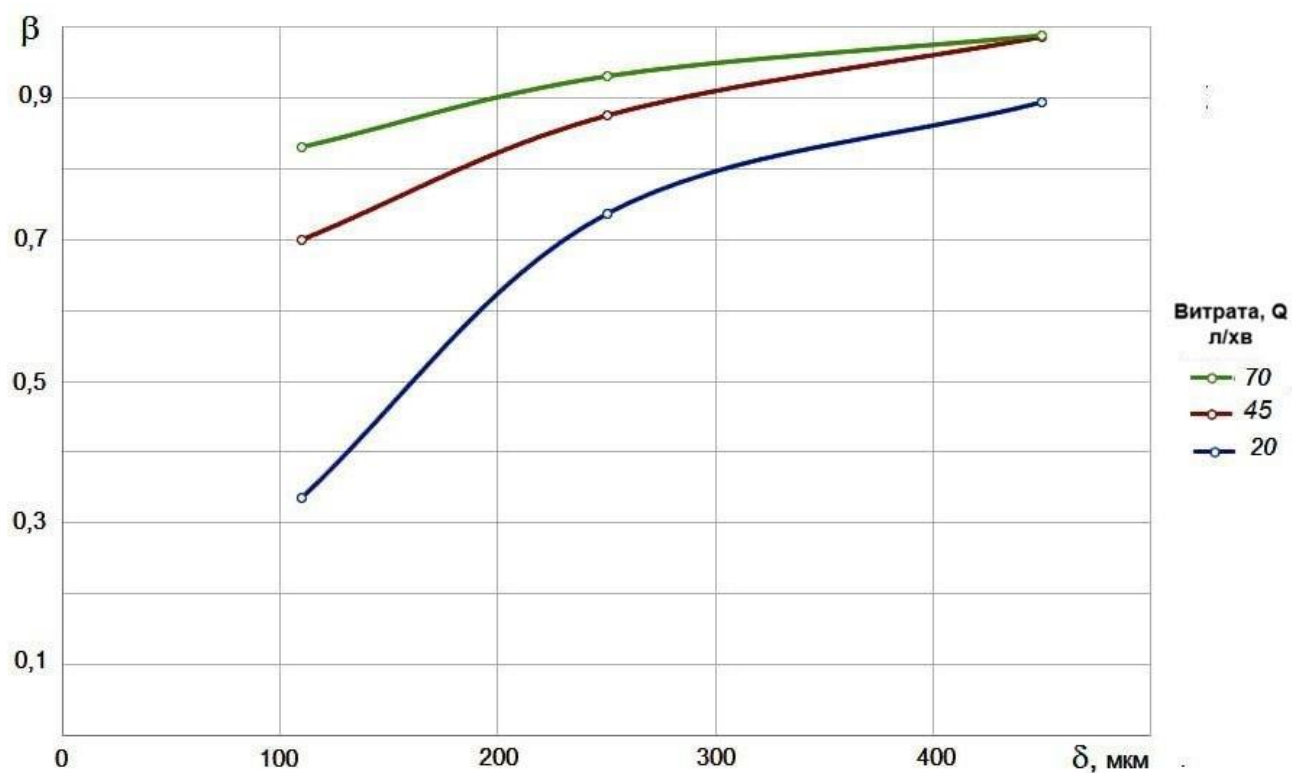


Рис. 3.8. Залежність коефіцієнта очищення β від розміру тестових частинок при різних витратах для варіанту ГФС №1

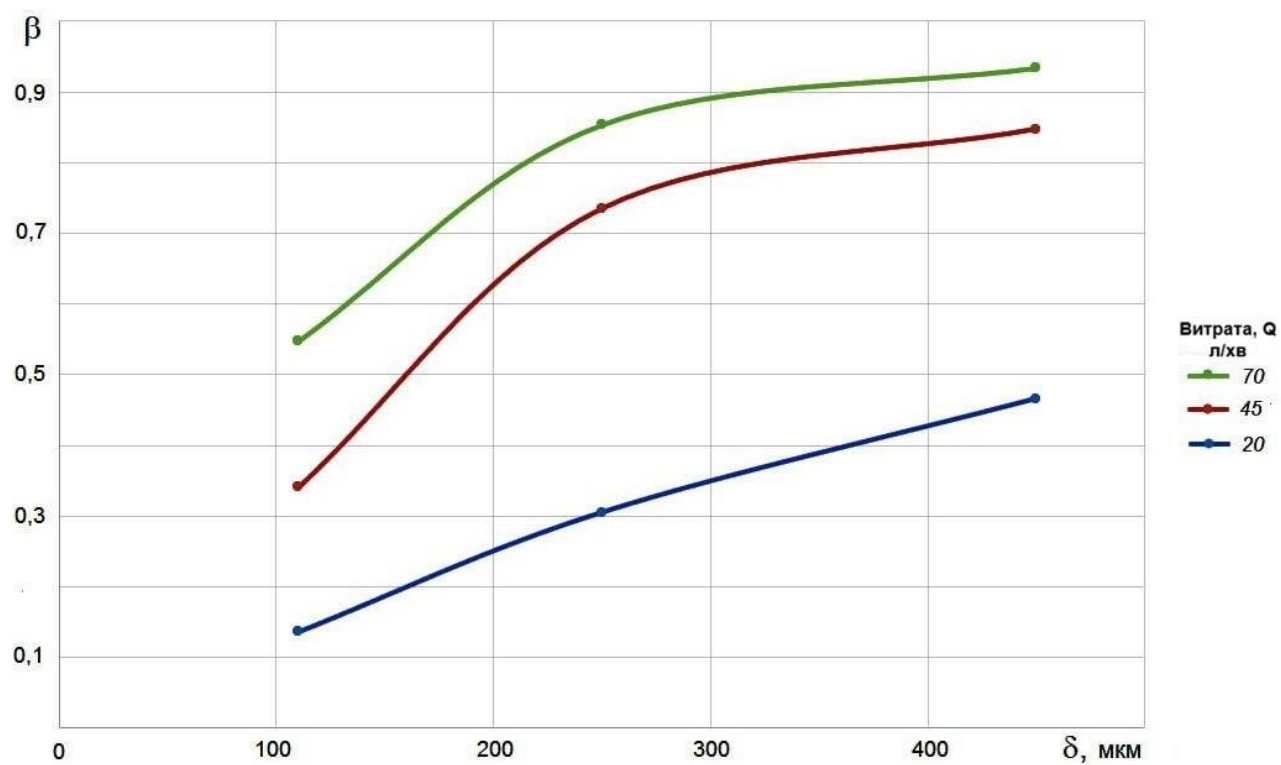


Рис. 3.9. Залежність коефіцієнта очищення β від розміру тестових частинок при різних витратах для варіанту ГФС №2

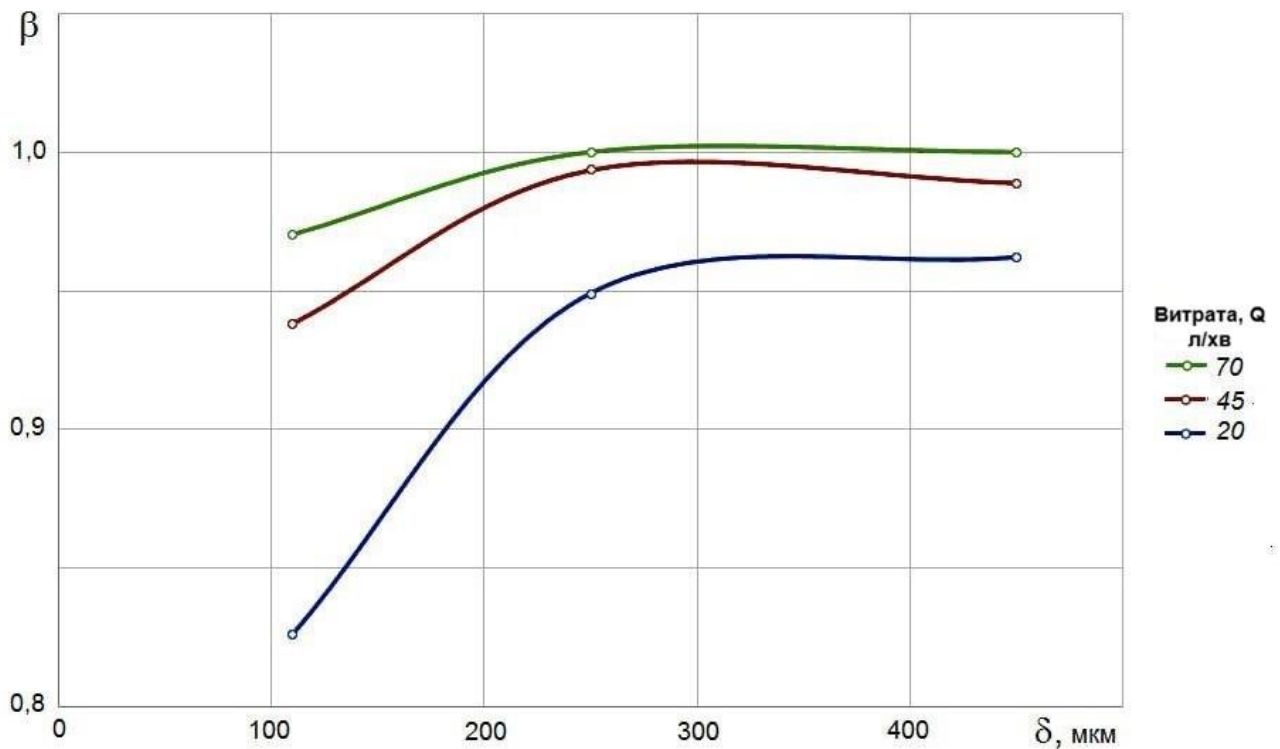


Рис. 3.10. Залежність коефіцієнта очищення β від розміру тестових частинок при різних витратах для варіанту ГФС №3

Оцінюючи дані графіків на рисунках 3.8 – 3.9, можна зробити висновок, що практично всі варіанти ГФС мають непогану здатність до уловлювання. На графіках чітко видно, що з підвищенням витрати (швидкості) потоку і зі збільшенням розміру тестових частинок здатність до уловлювання всіх варіантів ГФС зростає. Навіть при 40 л/хв. для частинок розміром 110 мкм коефіцієнт фільтрації β перевищує 0,7 для варіантів ГФС №1 і 3, що є хорошим результатом, який дає підстави для подальшої доробки цих фільтрів.

У процесі лабораторних досліджень також проводилося порівняння гідравлічних характеристик фільтрів різних конструкцій: вищевказаних варіантів ГФС, а також неповнопоточних ФОР виробництва фірм Donaldson і Valeo. На рис. 3.11 наведена залежність гідравлічного опору цих фільтрів від величини витрати рідини.

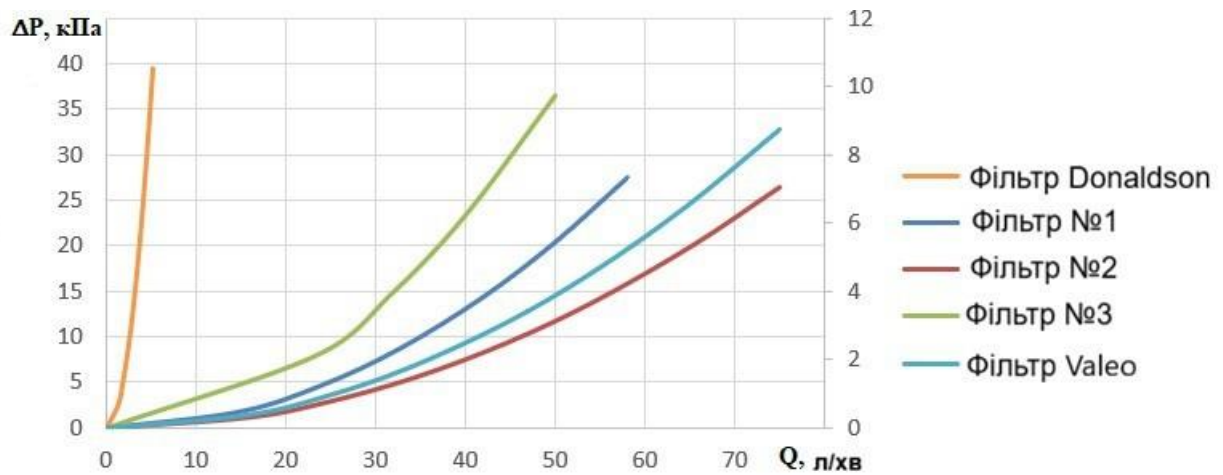


Рис. 3.11. Залежність гідрравлічного опору ΔP різних фільтрів ОР в залежності від витрати рідини Q (ліва шкала перепаду тисків ΔP тільки для фільтра компанії *Donaldson*, права – для всіх інших)

Результати порівняльного аналізу гідрравлічних характеристик різних ФОЖ (рис. 3.11) показують, що традиційні неповнопоточні фільтри типу spin-on (Donaldson, Baldwin, Fleetguard тощо) мають дуже значний гідрравлічний опір вже при витратах до 5 л/хв. Варіанти ГФС, а також фільтр фірми Valeo мають відносно невеликий опір до 50...75 л/хв. При цьому найкращий результат по гідрравлічному опору показав ГФС №2.

Висновки по розділу

Проведені дослідження розроблених зразків ГФС і зарубіжних фільтрів дозволяють зробити однозначний висновок про високу ефективність створених варіантів ГФС у порівнянні з зарубіжними аналогами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі наукових і практичних даних доведено актуальність і необхідність застосування очищення охолоджуючої рідини на сучасних автотранспортних поршневих двигунах, що мають високоефективні системи охолодження, які постійно ускладнюються в структурному і конструктивному аспектах, що вимагає більш високої чистоти охолоджуючої рідини. Узагальненою причиною появи забруднень різної природи в системах охолодження є фізико-хімічна взаємодія охолоджувальної рідини (антифризу) з різними елементами і різнорідними матеріалами системи охолодження. Використання абсолютно чистої охолоджувальної рідини в системах охолодження автомобільних і тракторних двигунів практично нереальне, оскільки завжди існуватимуть експлуатаційні умови, що сприяють утворенню забруднень.

Розроблено, виготовлено та успішно випробувано комплексну лабораторну установку для дослідження автомобільних пристроїв очищення (фільтрів) охолоджувальної рідини різних конструкцій і принципів дії. Створено та успішно пройдено практичну перевірку методики дослідження фільтрів охолоджуючої рідини

Проведений конструктивний аналіз і комплекс досліджень зарубіжних зразків фільтрів охолоджуючої рідини показав, що всі вони побудовані за традиційними принципами очищення рідин з використанням фільтруючих елементів (паперових, сітчастих тощо) і не відповідають вимогам сучасної автомобільної техніки. Такі фільтри мають цілу низку істотних недоліків і в цілому їх не можна вважати перспективними для автотранспортних двигунів.

На основі досвіду експлуатації автомобільної техніки сформовано комплекс вимог до перспективного пристрою очищення охолоджувальної рідини автотранспортних двигунів, що включає в себе функціональні вимоги та вимоги до його ефективності.

На основі проведених досліджень і дослідно-конструкторських робіт створено інноваційний високоефективний гідроциклонний фільтр-сепаратор охолоджуючої рідини автотранспортних двигунів

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Саух О.В. Розробка перспективної конструкції фільтра охолоджуючої рідини. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 82-86.
2. Грудовий Р.С., Саух О.В. Несправності в системах рідинного охолодження та їх вплив на роботу двигуна. Міжнародній науково-практичній конференції до Дня автомобіліста та дорожника “Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура ‘2025” (MAITRI 2025). 30-31 жовтня 2025 року. Харків. С.
3. Саух О., Заруцький С. Грудовий Р. Забруднення охолоджуючої рідини та їх джерела/ Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам’янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам’янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. . С. 227-229.
4. Далека В. Х. Двигуни внутрішнього згоряння: практичні матеріали. Харків: Екопро, 2008. 236 с.
5. Марціяш О. М. Експлуатація автомобільної техніки: навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ, 2016. 312 с.
6. Кисликов Ф. Г., Лущик В. М. Будова та експлуатація автомобілів. Київ: Вища школа, 2014. 384 с.
7. Ковтун О. П. Трактори і автомобілі: навчальний посібник. Київ: Аграрна освіта, 2012. 420 с.
8. Солоня О. В. Удосконалення системи охолодження автомобільного двигуна. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2019. 118 с.

9. Гришук В. М. Системи охолодження двигунів внутрішнього згоряння. Луцьк: ЛНТУ, 2017. 164 с.
10. Бойко В. С. Теплові процеси в автотракторних двигунах. Харків: ХНАДУ, 2015. 208 с.
11. Погорілий Л. В. Надійність машин і обладнання. Київ: НУБіП України, 2013. 256 с.
12. Шевченко І. А. Системи рідинного охолодження ДВЗ. Дніпро: ДНУ, 2020. 142 с.
13. Мельник О. О. Експлуатаційні матеріали автотранспортних засобів. Київ: Кондор, 2018. 198 с.
 - a. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 2018. 1072 p.
 - b. Stone R. Introduction to Internal Combustion Engines. London: Palgrave Macmillan, 2012. 560 p.
 - c. Woyciesjes P. M., Woodward S. M., Gershun A. V. The Characterization of Used Heavy Duty Engine Coolant. Warrendale: SAE International, 1993. 12 p.
 - d. Gavaskar A. R., Olfenbuttel R. F. Automotive Engine Coolant Recycling by Filtration. Washington: U.S. EPA, 1992. 34 p.
 - e. Cummins Filtration. Cooling System Maintenance Guidelines. Columbus: Fleetguard, 2020. 96 p.
 - f. Donaldson Company. Engine Coolant Filtration Systems. Minneapolis: Donaldson, 2019. 88 p.
 - g. Totten G. E. Handbook of Lubrication and Tribology. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1320 p.
 - h. ASTM International. Standard Specification for Engine Coolants ASTM D3306. West Conshohocken: ASTM, 2022. 24 p.
14. Pischinger S., Klell M. Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. Wien: Springer, 2017. 452 S.

15. Mollenhauer K., Tschöke H. Handbuch Dieselmotoren. Berlin: Springer Vieweg, 2015. 720 S.
16. Reif K. Automobilelektronik und Motormanagement. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. 640 S.
17. Bosch R. Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. 1180 S.
18. Donaldson GmbH. Kühlmittelfiltration für Fahrzeugmotoren. Ulm: Donaldson, 2020. 64 S.
19. Müller H. Kühlsysteme von Verbrennungsmotoren. München: Hanser, 2014. 286 S.