

Научная статья  
УДК 621.431.7-71

## Исследование основных характеристик модуля очистки охлаждающей жидкости двигателей тяжелой транспортной техники

Сергей Григорьевич Драгомиров<sup>1</sup>, Иван Викторович Кулешов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия

<sup>1</sup>ds33@bk.ru

<sup>2</sup>i-kouleshov@yandex.ru

**Аннотация.** Приведены результаты исследования перспективной конструкции модуля очистки охлаждающей жидкости двигателей тяжелой транспортной техники. Разработанный модуль представляет собой участок трубопровода большого диаметра (50 мм и более), который имеет байпасный канал с установленным в нем гидроциклонным фильтром-сепаратором. По результатам компьютерного моделирования макетного варианта модуля очистки было принято решение о введении в конструкцию специальных дефлекторов особой формы перед ответвлением байпасного канала с целью принудительного направления потока жидкости в байпасную ветвь (в фильтр-сепаратор). Результаты исследования показали, что гидравлическое сопротивление модуля очень незначительно (не превышает 6 кПа при расходах 600 л/мин), что является следствием байпасной компоновки гидроциклонного фильтра-сепаратора относительно основного трубопровода. Также экспериментально определено, что улавливающая способность модуля очистки при многократном проходе жидкости через гидроциклонный фильтр-сепаратор практически приближается к 100% для тестовых частиц размером около 100 мкм при расходах 500 л/мин. Также было исследовано расчетным и экспериментальным путями влияние геометрических параметров дефлекторов в канале модуля, направляющих поток жидкости в гидроциклонный фильтр-сепаратор. Разрабатываемая конструкция модуля очистки может быть успешно применена для двигателей тяжелой транспортной техники - на магистральных тягачах, тепловозах, речных судах и др.

**Ключевые слова:** транспортные поршневые двигатели, тяжелая транспортная техника, охлаждающая жидкость, загрязнения, очистка, модуль очистки, байпасная компоновка фильтра.

**Благодарности:** данное исследование выполнено в рамках реализации инновационного Проекта «Разработка, изготовление и испытания опытного образца фильтра охлаждающей жидкости на основе моделирования гидравлических и сепарационных процессов» (договор № 2914ГС1/45450) Программы СТАРТ.

**Для цитирования:** Драгомиров С.Г., Кулешов И.В. Исследование основных характеристик модуля очистки охлаждающей жидкости двигателей тяжелой транспортной техники // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1(35).

Original article

## Investigation of the main characteristics of the coolant purification module of heavy transport equipment engines

Sergei G. Dragomirov<sup>1</sup>, Ivan V. Kouleshov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VLSU), Vladimir, Russia

<sup>1</sup>ds33@bk.ru

<sup>2</sup>i-kouleshov@yandex.ru

**Abstract.** The results of a study of a promising design of a coolant purification module for heavy transport equipment engines are presented. The developed module is a section of a large diameter pipeline (50 mm or more), which has a bypass channel with a hydrocyclone filter separator installed in it. Based on the results of computer modeling of the mock-up version of the purification module, it was decided to introduce special deflectors of a special shape into the design before the bypass channel branch in order to force the flow of liquid into the bypass branch (into the filter separator). The results of the study showed that the hydraulic resistance of the module is very insignificant (does not exceed 6 kPa at a flow rate of 600 l/min), which is a consequence of the bypass layout of the hydrocyclone filter separator relative to the main pipeline. It was also experimentally determined that the trapping capacity of the purification module during repeated passage of liquid through a hydrocyclone filter separator is almost close to 100% for test particles of about 100 microns in size at a flow rate of 500 l/min. The influence of geometric parameters of deflectors in the module channel directing the liquid flow into the hydrocyclone filter separator was also investigated by calculation and experimentally. The developed design of the cleaning module can be successfully applied to engines of heavy transport equipment - mainline tractors, diesel locomotives, river vessels, etc.

**Key words:** transport piston engines, heavy transport equipment, coolant, pollution, cleaning, cleaning module, bypass filter layout.

**Acknowledgements:** this study was carried out as part of the implementation of the innovative Project "Development, manufacture and testing of a prototype coolant filter based on the simulation of hydraulic and separation processes" (contract No. 2914GS1 / 45450) of the START Program.

**For citation:** Dragomirov S.G., Kouleshov I.V. Investigation of the main characteristics of the coolant purification module of heavy transport equipment engines. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №1 (35).

## Введение

Актуальность решения проблемы загрязнения охлаждающей жидкости транспортных поршневых двигателей обусловлена структурными и конструктивными усложнениями их систем жидкостного охлаждения (СЖО) при одновременном повышении требований к надежности и теплоотводящей способности в процессе непрерывного форсирования двигателей [1,2].

Неизбежность загрязнения системы охлаждения транспортных двигателей (особенно тяжелонагруженных) и отсутствие на сегодняшний день эффективных научно-технических решений в этой области делают решение данной проблемы загрязнения крайне актуальным в мировом двигателестроении.

Данные по эксплуатации транспортной техники показывают [3,4], что от 25 до 40% неисправностей и отказов двигателей приходится на СЖО. Чаще всего неполадки в системе охлаждения, например, автомобиля, появляются уже после 150...200 тыс. км его пробега. У двигателей тяжелых грузовиков (а также автобусов), работающих обычно с 70...85% нагрузкой, из-за более тяжелых условий работы неполадки могут возникнуть уже после 500...700 часов эксплуатации (30...50 тыс. км пробега).

По имеющимся данным [5,6], отказы СЖО тепловозного дизеля составляют от 16 до 23% среди всех отказов систем и узлов тепловозов. Из всех отказов СЖО 68...73% приходится на неисправности секций теплообменника системы охлаждения, т.е. тех элементов СЖО, которые наиболее подвержены загрязнению.

По другим данным [7], эта цифра по отказам радиаторных секций теплообменников может достигать до 96% при среднем ресурсе их работы в 61,8 тыс. км пробега тепловоза.

Загрязнение ОЖ и системы охлаждения двигателя в целом неизбежно в силу существования ряда производственно-технологических причин (наличие формовочного песка, стружки, частиц абразива, окалина в процессе

производства), из-за физико-химических процессов, протекающих в полостях системы охлаждения (кавитационной эрозии и химической коррозии металлических элементов системы охлаждения, образования накипи и отложений и др.), а также появления продуктов разложения антифризов. Вследствие невысокой культуры эксплуатации система может загрязняться песком, частицами герметиков, фрагментами прокладок, продуктами для предотвращения течей и др., привносимыми в систему извне.

**Обобщенная причина** появления (генерации) загрязнений в СЖО – физико-химическое взаимодействие ОЖ с различными разнородными элементами и материалами системы охлаждения. Результатом этого физико-химического взаимодействия является кавитационная эрозия металлов, их химическая коррозия, образование накипи и различных отложений, разложение присадок, разрушение элементов системы и т.п.

Как показывают исследования надежности работы охлаждающих устройств тепловозов, только в локомотивных депо Тынды и Комсомольск (Дальневосточной дороги) из года в год происходит до 1000 отказов различных узлов охлаждающих устройств. В каждом депо только на неплановое восстановление их работоспособности расходуется 10...15 млн руб. в год. Коэффициент готовности локомотивов, определяемый охлаждающими устройствами тепловозов, не превышает 0,84 [7].

При этом доля неплановых ремонтов тепловозов по причине отказов системы охлаждения дизеля составляет 13,5%, причем количество таких неплановых ремонтов имеет явную тенденцию к увеличению.

Следует отметить, что относительное количество неплановых ремонтов по причине отказов СЖО дизелей (т.е. количество неплановых ремонтов, отнесенное ко всему парку тепловозов ОАО «РЖД») также неуклонно возрастает.

Всё это приводит к огромным экономическим потерям при эксплуатации тяжелой транспортной техники.

### Компьютерное моделирование функционирования модуля очистки охлаждающей жидкости

В качестве первоначального варианта была разработана компьютерная модель макетного варианта модуля очистки (рис. 1.) со следующими геометрическими характеристиками:

- длина модуля 350 мм;
- наружный диаметр основного канала 80 мм;
- типоразмер фильтра-сепаратора ФС-38А.

Проектирование и расчет модуля производилось при помощи *SolidWorks*, а также пакета *FlowSimulation* – программы для расчета течения жидкостей и газов.

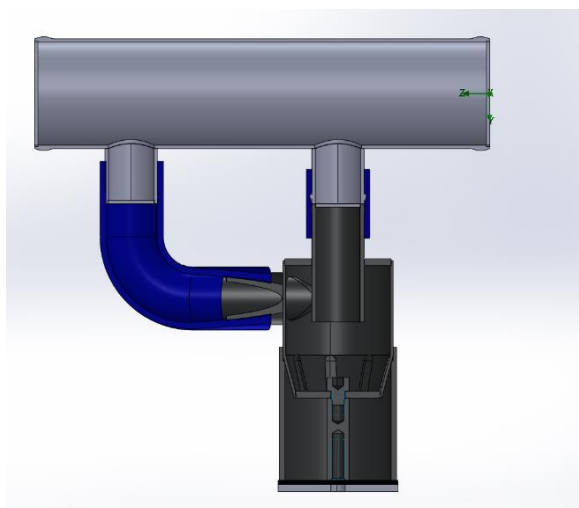


Рис. 1. Компьютерная модель макетного варианта модуля в разрезе

Расчет производился со следующими параметрами:

- размер ячейки сетки 0,04 м;
- число ячеек - 325000;
- расходы жидкости через модуль, последовательно, от 50 до 500 л/мин.

После завершения расчетов необходимо было получить гидравлическую характеристику

данного макетного варианта модуля. По результатам расчета было установлено, что поток жидкости через байпасный контур (включая фильтр-сепаратор) практически не проходит. При этом гидравлическое сопротивление самого модуля (рис. 2.) близко к нулю. Так же с помощью расчета установлены расходы через фильтр и байпас, что подтверждает вышесказанное (рис. 3.).

На рисунке 4 показано сечение макетного варианта модуля с распределением скоростей потока движущейся внутри жидкости.

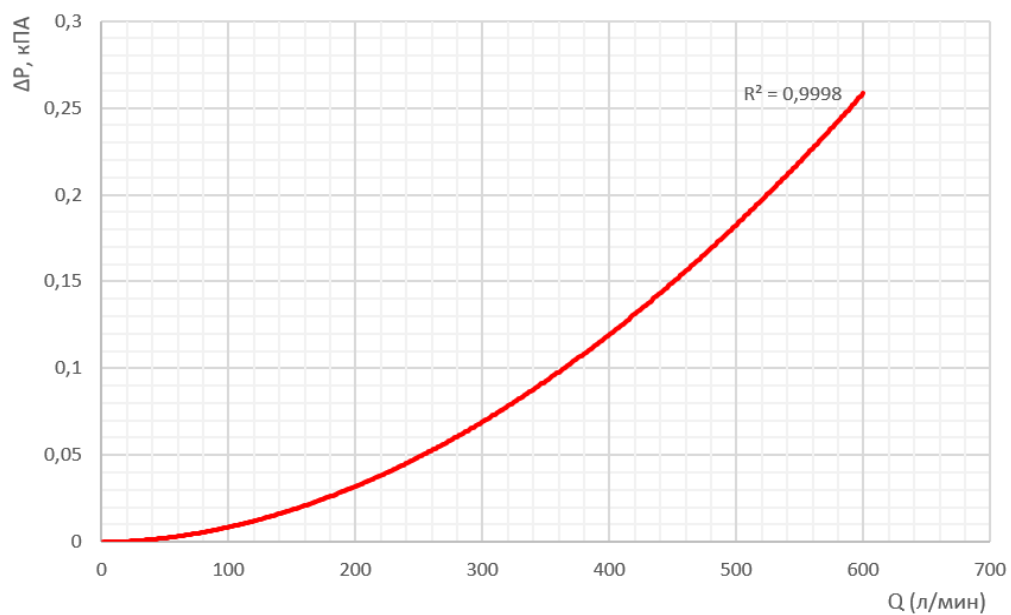


Рис. 2. Гидравлическое сопротивление макетного варианта модуля очистки

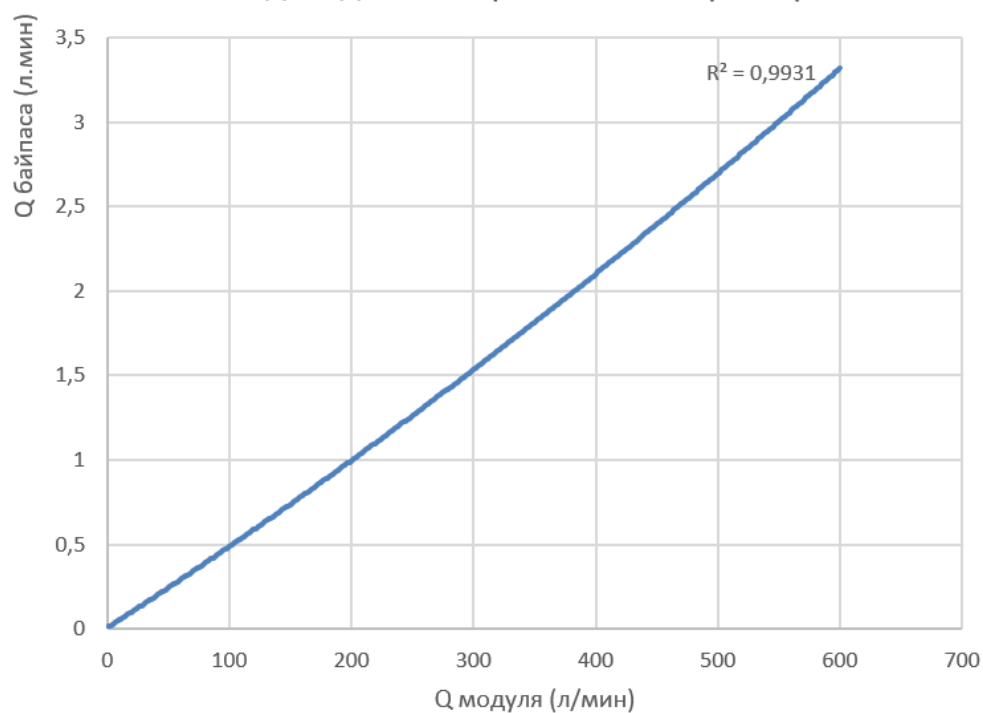
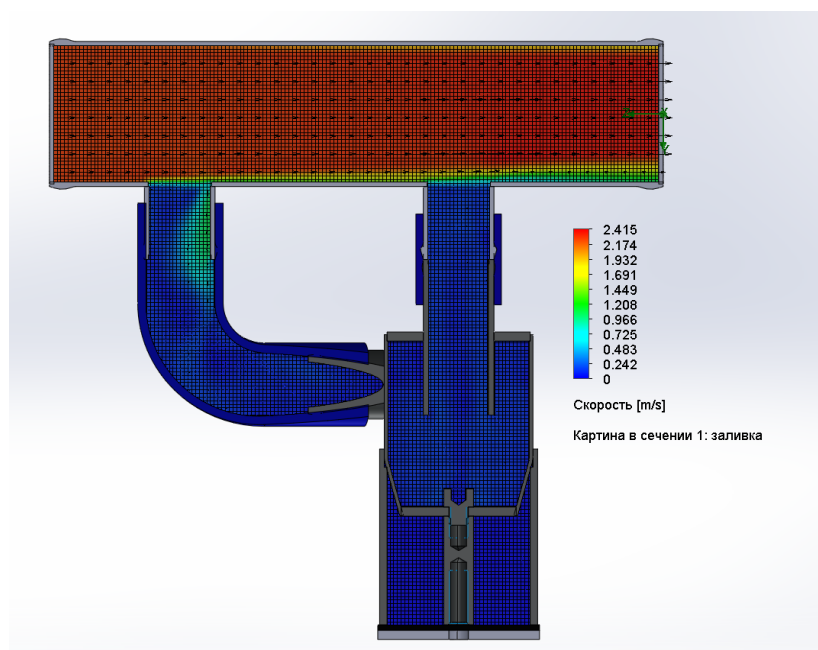


Рис. 3. Расход жидкости через байпасный фильтр в макетном варианте модуля



*Рис. 4. Сечение макетного варианта модуля очистки с распределением скоростей потока жидкости*

По результатам компьютерного моделирования макетного варианта модуля очистки было принято решение о введении в конструкцию специальных дефлекторов особой формы перед ответвлением байпасного канала с целью принудительного направления потока жидкости в байпасную ветвь (в фильтр-сепаратор). Было проведено исследование, по результатам которого установлена зависимость расхода жидкости через байпас (фильтр-сепаратор) от относительной площади перекрытия  $S$  основного канала модуля очистки. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Под относительной площадью перекрытия (коэффициентом перекрытия) основного канала модуля понимается величина  $S = S_k/S_o$ , %. Здесь  $S_o$  – площадь основного канала патрубка;  $S_k$  – площадь дефлектора в основном канале патрубка.

По итогам компьютерного моделирования, а также учитывая полученные результаты по расходу жидкости через байпасный канал и фильтр-сепаратор, для изготовления опытного образца была принята конструкция модуля очистки со следующими геометрическими параметрами:

- наружный диаметр главной трубы модуля очистки 80 мм;

- длина модуля очистки 330 мм;
- коэффициент перекрытия  $S = 40\%$ ;

В составе модуля очистки используется гидроциклонный фильтр-сепаратор ФС-38М (ТУ 28.29.12-001-31706395-2018) производства ООО «НТЦ «АвтоСфера» при ВлГУ».

Таблица 1

Зависимость расхода через байпасный канал от величины относительного перекрытия  $S$  при номинальном расходе  $Q = 600$  л/мин

| $S, \%$ | $Q, \text{л/мин}$ | $q, \%$ |
|---------|-------------------|---------|
| 0       | 3,2               | 0,51    |
| 10      | 27,41             | 4,56    |
| 20      | 35,23             | 5,87    |
| 30      | 45,07             | 7,51    |
| 40      | 57,95             | 9,65    |
| 50      | 72,6              | 12,13   |
| 60      | 93,85             | 15,64   |
| 70      | 125,91            | 20,98   |

**Примечание:** относительный расход  $q$  (%) через фильтр-сепаратор определяется как  $q=Q/Q_{\phi}$ , где  $Q$  – общий расход жидкости через модуль, л/мин.;  $Q_{\phi}$  – парциальный расход жидкости через фильтр-сепаратор, л/мин.

### Лабораторная установка для исследования модуля очистки

При создании модуля очистки охлаждающей жидкости для двигателей тяжелой транспортной техники была разработана и изготовлена лабораторная установка. Работа лабораторной установки имитирует реальное функционирование модуля очистки в условиях эксплуатации тяжелой транспортной техники.

Она представляет собой замкнутый гидравлический контур (рис. 5), упрощенно имитирующий контур системы охлаждения двигателя, который включает различные узлы и компоненты. Движение жидкости в системе обеспечивает насос с электроприводом модели *Pedrollo HF5A* (Италия). Расход жидкости, подаваемой насосом, плавно регулируется за счет частотного преобразователя марки *Innovert ITD 152U21B2*. Для определения расхода в системе установлен ультразвуковой расходомер *US-800* ( $D_y=50$  мм, однолучевое исполнение, Россия).

Исследуемый модуль очистки устанавливался на стойках в разрыве патрубков. В качестве рабочей жидкости (вместо антифриза) в установке использовалась обычная водопроводная вода с плотностью  $1 \text{ кг/дм}^3$ .

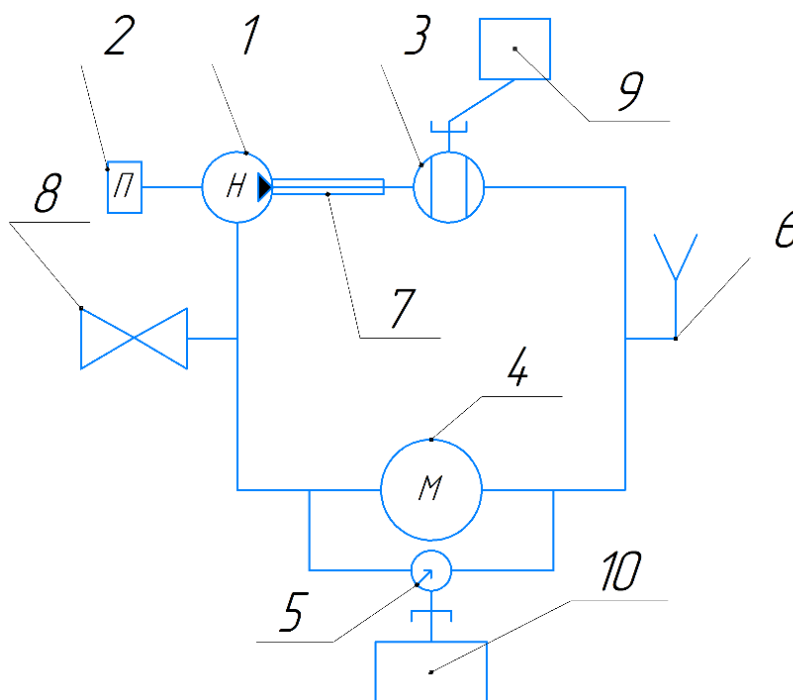


Рис. 5. Общая схема лабораторной установки: 1 – насос *Pedrollo HF5A*; 2 – частотный преобразователь *Innovert ITD 152U21B2*; 3 – ультразвуковой расходомер жидкости *US-800*; 4 – исследуемый модуль очистки; 5 – дифференциальный полупроводниковый датчик давления *Honeywell MPX5010DP*; 6 – заливная горловина; 7 – успокоитель потока жидкости; 8 – сливной кран; 9 – информационное табло расходомера; 10 – ноутбук со специализированным ПО

Для визуального наблюдения за потоком один из участков гидравлического контура был выполнен из отрезка стеклянной трубки соответствующего диаметра. Это позволяло видеть течение потока, пузырьки воздуха и частицы загрязнений в потоке. Воронка 6 использовалась для заполнения рабочего контура жидкостью, удаления воздуха из жидкостного контура установки и введения тестовых частиц, имитирующих загрязнения системы жидкостного охлаждения.

Для определения гидравлического сопротивления на участке, где установлен модуль фильтрации применялись микроэлектронные полупроводниковые датчики давления типа *MPX5010DP* (диапазон измерения 0...10 кПа) и *MPX5050DP* (диапазон измерения 0...50 кПа) фирмы *Honeywell* (США).

Сигналы от микроэлектронных датчиков давления и ультразвукового расходомера-счетчика обрабатываются с помощью ноутбука со специальным программным обеспечением (в данной работе были задействованы ресурсы программы *LabVIEW*). Вся информация, поступающая в компьютер, отображалась на мониторе в режиме реального времени и записывалась в виде файла.

Размер тестовых частиц составлял  $105 \pm 10$  мкм, что соответствует необходимой и достаточной тонкости очистки охлаждающей жидкости в процессе эксплуатации двигателей тяжелой транспортной техники. Даже если разрабатываемый модуль очистки будет пропускать частицы твердых загрязнений с размерами менее 100 мкм, это не является критически опасным, т.к. в системах охлаждения двигателей тяжелой транспортной техники не существует зазоров менее 0,8 мм (800 мкм).

### **Методика исследования модуля очистки**

Изготовленная на основе расчетов конструкция модуля очистки проходила лабораторные испытания для определения реального

гидравлического сопротивления, а также показателей улавливания тестовых частиц загрязнений.

Методика определения гидравлического сопротивления модуля очистки заключалась в следующем.

1. Собирается герметичный контур лабораторной установки.
2. Контур заполняется жидкостью (водопроводной водой).
3. Подается электропитание на насос и начинается циркуляция жидкости в контуре.
4. Перед началом исследования необходимо выждать некоторое время для того, что бы воздух, неизбежно попадающий в контур системы, был удален. Это необходимо для того, что бы избежать ошибок в показаниях как ультразвукового расходомера, так и датчиков давлений.
5. Начинается эксперимент с установления необходимого расхода. Обычно с 60 л/мин, постепенно увеличивая расход до максимально возможного. Максимальный расход (600 л/мин) ограничен характеристиками насоса и особенностями контура, отдельные элементы которого создают сопротивление, влияющее на расход.
6. После достижения нужного расхода необходимо выждать некоторое время для стабилизации потока.
7. С помощью специализированного ПО и подготовленной программы в среде *LabView*, проводятся измерения, позволяющие получить параметры течения жидкости через модуль.
8. Полученные данные заносятся в таблицу и по ним строятся графики полученных зависимостей.

Устройство регулировки частоты вращения вала электродвигателя насоса позволяло плавно регулировать расход жидкости, фиксируемый расходомером.

При работающем насосе с заполненным водой гидравлическим контуром и удаленными остатками воздуха через воронку вводились

тестовые частицы загрязнений в определенном количестве по массе. В зависимости от задач и методики исследования, масса частиц твердых загрязнений, вводимых в поток, находилась в пределах 20...50 г. При этом тестовые частицы загрязнений вместе с жидкостью многократно проходят через модуль очистки в процессе исследования.

При некотором расходе жидкости  $Q$  и известном объеме  $V$  внутренних полостей гидравлической части установки, время  $\Delta t$ , за которое жидкость однократно пройдет весь гидравлический контур установки, определится по формуле:  $\Delta t = V/Q$ , где  $V$  – объем внутренних полостей гидравлического контура установки (const),  $Q$  – текущий расход жидкости, поддерживаемый насосом с электроприводом.

Количество проходов  $i$  рабочей жидкости через гидравлический контур установки за время опыта  $T$  определится:

$$i = T/\Delta t$$

После некоторого времени  $T$  работы лабораторной установки (определяется конкретными условиями испытания), центробежный насос выключается, жидкость удаляется из системы с помощью сливного крана 3, встроенного в контур.

Уловленные фильтром-сепаратором тестовые частицы извлекаются из грязесборника, а затем высушиваются в лабораторной печи для удаления влаги. Сухие частицы загрязнений взвешиваются, после чего вычисляется коэффициент очистки по формуле:

$$K = m_2/m_1,$$

где  $m_1$  – масса тестовых частиц, введенных в гидравлический контур;  $m_2$  – масса тестовых частиц, уловленных фильтром-сепаратором (из грязесборника).

### Лабораторные исследования модуля очистки и их анализ

Основные задачи лабораторного исследования:

- выявление эффективности улавливания тестовых частиц загрязнений с помощью опытного варианта устройства.

- определение гидравлической характеристики (гидравлического сопротивления) модуля фильтрации на соответствие требованиям потенциального Заказчика.

В качестве объекта исследования был принят модуль очистки охлаждающей жидкости с наружным диаметром главной трубы модуля 80 мм, а так же с установленным в байпасный канал гидроциклонным фильтром-сепаратором ФС-38А.

Была получена гидравлическая характеристика исследуемого модуля очистки, представленная на рисунке 6.

Далее, была определена улавливающая способность (коэффициент очистки  $K$ ) модуля очистки. Для этого использовалась навеска тестовых частиц размером около 100 мкм и массой 25 г.

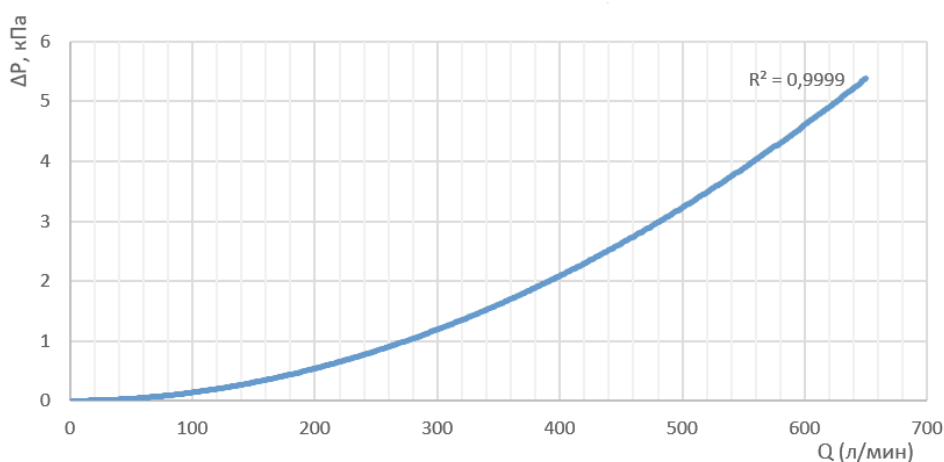


Рис. 6. Гидравлическая характеристика опытного образца модуля очистки

С помощью частотного преобразователя установлен номинальный расход жидкости 500 л/мин, а так же определен временной шаг, равный 30 секундам. Зная время ( $t$ ), объем контура, а так же расход, было рассчитано количество проходов жидкости через модуль ( $i$ ), что показано в таблице 2.

Таблица 2

Результаты исследования улавливающей способности модуля очистки

| $t, c$ | $i$  | $f_1, г$ | $K, \%$ |
|--------|------|----------|---------|
| 30     | 35,7 | 15,13    | 64%     |
| 60     | 71,4 | 22,7     | 90,8%   |
| 90     | 107  | 23,35    | 93,4%   |

Поскольку проектируемый модуль будет работать в замкнутых гидравлических системах, где число проходов исчисляется сотнями тысяч, его эффективность будет приближаться к максимально возможной (100%) за время длительной эксплуатации.

Так же были исследованы образцы модуля очистки с различными вариантами формы дефлекторов. Установлено, что их гидравлические характеристики не отличаются, а предпочтение в выборе формы дефлекторов, а так же при доработке конструкции модуля следует отдать более технологичному в изготовлении варианту.

### Выводы

1. Созданный модуль очистки охлаждающей жидкости работоспособен и может эффективно выполнять свои функции в системах охлаждения двигателей тяжелой транспортной техники.

1. Гидравлическое сопротивление модуля очень незначительно (не превышает 6 кПа при расходах 600 л/мин), что является следствием байпасной компоновки гидроциклонного фильтра-сепаратора относительно основного трубопровода.

2. Улавливающая способность (коэффициент очистки) модуля при многократном проходе жидкости через гидроциклонный фильтр-сепаратор практически приближается к 100% для тестовых частиц размером около 100 мкм.

## Список источников

1. Системы охлаждения поршневых ДВС: монография / И.Е. Иванов и др. – М.: МАДИ, 2015. – 168 с.
2. Системы охлаждения тракторных и автомобильных двигателей. Конструкция, теория, проектирование / А.И. Якубович и др. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2014. – 473 с.
3. Руководство по продуктам для системы охлаждения. – Cummins Filtration, 2009. – 8 с.
4. Engine cooling. – Behr Hella Service GmbH., 2008, 52 pp.
5. Овчаренко, С.М. Оперативный контроль эффективности работы системы охлаждения тепловоза / С.М. Овчаренко // Известия ТРАНССИБА. – 2019. – №4(40). – с. 9-17.
6. Балагин, О.В. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния секций холодильников тепловозных дизелей: Дисс. ... канд. техн. наук / Балагин О.В. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2005. – 165 с., ил.
7. Слободенюк, А.С. Повышение эффективности охлаждающих устройств тепловозов: дисс. ... канд. техн. наук / Слободенюк А.С. – Хабаровск: Дальневосточный ун-т путей сообщения, 2010. – 112 с., ил.

## Refetences

- 1.Ivanov I.E. et al. *Sistemy okhlazhdeniya porshnevykh DVS* (Piston engine cooling systems), Moscow, MADI, 2015, 168 p.
- 2.Yakubovich A.I. et al. *Sistemy okhlazhdeniya traktornykh i avtomobil'nykh dvigateley. Konstruktsiya, teoriya, proyektirovaniye* (Cooling systems for tractor and automobile engines. Construction, theory, design), Minsk, Novoye znaniye, Moscow, INFRA-M, 2014, 473p.
- 3.Product guide for the cooling system. – Cummins Filtration, 2009. – 8 pp.
4. Engine cooling. – Behr Hella Service GmbH., 2008, 52 pp.
5. Ovcharenko S.M. *Izvestiya TRANSSIBA*, 2019, №4(40), pp. 9-17
6. 6. Balagin O.V. *Razrabotka tekhnologii teplovizionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya sektsiy kholodil'nikov teplovoznnykh dizeley* 9*Development of technology of thermal imaging control of technical condition of sections of refrigerators of diesel locomotives*, Candidate's thesis, Omsk, Omsk State University of Railway Transport, 2005, 165 pp.
7. Slobodenyuk A.S. *Povysheniye effektivnosti okhlazhdayushchikh ustroystv teplovozo*v (Improving the efficiency of cooling devices of diesel locomotives), Candidate's thesis, Khabarovsk, Far Eastern Railway University, 2010, 112 pp.

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Рецензент: М.Г. Шатров, д-р техн. наук, проф., МАДИ

## ***Информация об авторах***

Драгомиров Сергей Григорьевич, д-р техн. наук, проф., ВлГУ.  
Кулешов Иван Викторович, аспирант, ВлГУ

## ***Information about the authors***

Dragomirov Sergei G., Dr. Sc., professor, VLSU  
Kouleshov Ivan V., postgraduate, VLSU

*Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 01.03.2023; принята к публикации 17.03.2023.*

*The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 01.03.2023; accepted for publication 17.03.2023.*