

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.9.4. – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК: 62-732

DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-2-32-49

Экспериментальное исследование и оптимизация параметров контрольного фильтроэлемента для метода динамических измерений уровня промышленной чистоты авиатоплива

**А.А. Браилко¹, С.Н. Айрапетов², С.А. Савушкин¹, К.Э. Балышин¹,
И.В. Пархачева¹**

¹ *Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

² *Чжецзянский институт турбинного оборудования и двигательных систем,
г. Ханчжоу, Китай*

Аннотация: Обеспечение чистоты авиационного топлива от механических примесей является критически важным фактором безопасности полетов. Существующие методы лабораторного контроля чистоты топлива носят дискретный характер и не позволяют оперативно выявлять загрязнения в процессе заправки воздушных судов, что создает серьезные риски. Целью данной работы было экспериментальное исследование и оптимизация параметров неполнопоточного контрольного фильтра (КФ) для создания системы непрерывного мониторинга чистоты авиатоплива в реальном режиме времени. Ключевым диагностическим параметром в настоящем исследовании выступил перепад давления на фильтроэлементе (ФЭ), который напрямую коррелирует с количеством накопленных механических примесей. В ходе работы был использован комплекс экспериментальных и аналитических методов: проведены стендовые испытания гофрированных полипропиленовых ФЭ с различной площадью поверхности, в ходе которых измерялась зависимость перепада давления от массы подведенного загрязнителя (смеси каолинов). В результате была получена зависимость перепада давления от удельной грязеемкости. Было выявлено, что эта зависимость имеет четыре характерные зоны: начальную линейную, где перепад давления растет пропорционально загрязнению, и три нелинейные, где скорость роста перепада давления существенно увеличивается по мере закупорки пор ФЭ. На основе этой экспериментальной кривой было проведено параметрическое исследование, которое показало, что для оптимальной работы КФ его площадь фильтрации должна составлять 0,05–0,10 м². На основании исследования предложена система оперативного контроля чистоты авиатоплива с использованием контрольного фильтра, что обеспечивает не только высокий ресурс (200–400 заправок), но и высокую чувствительность системы: расчетное время реакции на превышение браковочного уровня загрязненности составляет в среднем 5–10 с, что определяется скоростью изменения перепада давления при поступлении примесей. Доказана практическая целесообразность использования контрольного фильтра, где перепад давления служит надежным и информативным параметром для создания системы оперативного предупреждения о загрязнении авиатоплива непосредственно в процессе заправки.

Ключевые слова: авиационное топливо, чистота топлива, механические примеси, непрерывный мониторинг, контрольный фильтр, неполнопоточный фильтр, экспериментальное исследование, оптимизация параметров, грязеемкость, перепад давления.

Для цитирования: Браилко А.А. Экспериментальное исследование и оптимизация параметров контрольного фильтроэлемента для метода динамических измерений уровня промышленной чистоты авиатоплива / А.А. Браилко, С.Н. Айрапетов, С.А. Савушкин, К.Э. Балышин, И.В. Пархачева // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 2. С. 32–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-2-32-49

Experimental investigation and optimization of a check filter element for the dynamic measurement method of aviation fuel industrial cleanliness level

A.A. Brailko¹, S.N. Ayrapetov², S.A. Savushkin¹, K.E. Balyshin¹,
I.B. Parkhacheva¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

²*Zhejiang Institute of Turbine Equipment and Propulsion Systems, Hangzhou, China*

Abstract: Ensuring the cleanliness of aviation fuel from mechanical impurities is a critical factor in flight safety. Existing laboratory methods for monitoring fuel cleanliness are discrete and do not allow for the prompt detection of contaminants during aircraft refueling, which creates significant risks. The objective of this study was to experimentally investigate and optimize the parameters of a partial-flow control filter to create a system for continuous, real-time monitoring of aviation fuel cleanliness. The key diagnostic parameter in this study was the pressure drop across the filter element, which directly correlates with the amount of accumulated mechanical impurities. A combination of experimental and analytical methods was used in the study: bench tests were conducted on corrugated polypropylene filter elements with varying surface areas, during which the dependence of the pressure drop on the mass of the introduced contaminant (kaolin mixture) was measured. This resulted in the dependence of the pressure drop on the specific contaminant capacity. It was found that this dependence has four characteristic zones: an initial linear zone, where the pressure drop increases proportionally to the contamination, and three nonlinear zones, where the rate of pressure drop increase significantly as the pores of the filter element become clogged. A parametric study was conducted using this experimental curve, which showed that for optimal filter operation, its filtration area should be 0.05–0.10 m². Based on this study, a system for operational monitoring of aviation fuel cleanliness using a check filter was proposed. This ensures not only a long service life (200–400 refuelings) but also high system sensitivity: the estimated response time to exceeding the rejection level of contamination averages 5–10 seconds, which is determined by the rate of change in the pressure drop upon the influx of impurities. The practical feasibility of using a check filter, where the pressure drop serves as a reliable and informative parameter for creating a system for promptly warning of aviation fuel contamination directly during refueling, was proved.

Keywords: aviation fuel, fuel cleanliness, mechanical impurities, continuous monitoring, check filter, partial-flow filter, experimental study, parameter optimization, contaminant capacity, pressure drop.

For citation: Brailko, A.A., Ayrapetov, S.N., Savushkin, S.A., Balyshin, K.E., Parkhacheva, I.B. (2026). Experimental investigation and optimization of a check filter element for the dynamic measurement method of aviation fuel industrial cleanliness level. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 29, no. 2, pp. 32–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-2-32-49

Введение

Обеспечение безопасности полетов является одной из основных задач всех предприятий, осуществляющих летную эксплуатацию и наземное обслуживание воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА). Топливозаправочные комплексы, обеспечивающие заправку ВС кондиционными авиаГСМ, прямо влияют на безопасность полетов [1].

Кондиционность авиатоплива в значительной степени обеспечивается отстаиванием, фильтрацией и добавлением специальных присадок. Весь этот комплекс мероприятий позволяет поддерживать концентрацию механических примесей и размер загрязняющих частиц в соответствии с нормативными тре-

бованиями. Разработка устройств, обеспечивающих измерение и индикацию загрязненности авиатоплива механическими примесями непосредственно в процессе его перекачки и заправки в ВС, является одним из актуальных направлений совершенствования процесса авиатопливообеспечения.

Согласно действующей нормативной документации контроль качества авиаГСМ проводится путем лабораторных анализов проб по установленным показателям, а также визуальным экспресс-контролем. Отбор проб авиатоплива выполняется по всему пути его движения, начиная с площадки приема от поставщика и заканчивая топливными баками ВС. Точки отбора проб приурочены к зонам наиболее вероятного скопления механиче-

ских примесей и свободной воды (нижние точки трубопроводов и цистерн автотопливозаправщиков, отстойники фильтров и т. п.).

Прием, хранение, перекачка и заправка авиатоплива в ВС сопровождаются как процессами его очищения от механических примесей (фильтрованием и отстаиванием), так и процессами загрязнения частицами износа и коррозии оборудования, а также атмосферной пылью, поступающей через дыхательные устройства. Вследствие непрерывности указанных процессов точечные по времени и месту пробы имеют ограниченный предел достоверности оценки чистоты авиатоплива. В некоторых случаях это может критически повлиять на безопасность полета ВС. Особый риск имеет место при заправке ВС. Конечным очищающим устройством в этом процессе является фильтр-водоотделитель (ФВО) заправщика. В случае уменьшения фильтрующей способности ФВО количество и (или) размер мехпримесей может превысить нормативную величину. Источником неконтролируемого в процессе заправки ВС загрязнения авиатоплива могут стать поврежденные фильтроэлементы (ФЭ) ФВО, а также частицы износа рукавов, счетчика и других устройств, расположенных между ФВО и накопником нижней заправки (ННЗ).

Основная часть

Для устранения указанной проблемы предложено несколько методов и устройств непрерывного по времени контроля механических примесей [2]. Например, счетчик частиц Parker MCM20¹ или анализатор загрязненности топлива Velcon VCA² [3], использующие лазерное сканирование потока; индикатор «Поток-РТ» в модификации

«ЗОНД»³, действие которого основано на фотоэлектрическом эффекте [4]. Предложены также устройства [5, 6], действие которых основано на использовании известной зависимости перепада давления на неполнопроходном контрольном фильтре от массы загрязнителя, подведенного к нему.

Применение КФ, основанное на хорошо изученных законах фильтрации [7, 8], представляется надежным и достоверным методом.

Схема применения КФ в составе топливозаправщика показана на рис. 1.

Авиатопливо, в том числе в смеси с противодокристаллизационной жидкостью (ПВКЖ), отбирается на КФ за расходомером. В точке отбора давление регулируется клапаном in-line и в зависимости от его настройки составляет, как правило, 0,35...0,38 МПа. После КФ поток направляется на вход насоса топливозаправщика, где давление близко к нулю всегда, за исключением кратких периодов пуска и останова процесса. Максимальный перепад давления на КФ достигается при его полном загрязнении и равен давлению заправки.

Если известна зависимость перепада давления на КФ от количества подведенного к нему загрязнителя, то по измеренному на определенном интервале времени перепаду давления можно вычислить количество механической примеси, поступившей на КФ за этот период. Далее, измеряя объем авиатоплива, прошедший через КФ за период измерения, можно определить концентрацию мехпримесей в нем. Указанные вычисления целесообразно поручить микропроцессору.

Для практической и экономически обоснованной реализации КФ, требуется выбор его ФЭ, обеспечивающего оптимальное соотношение грязеемкости и чувствительности к уровню загрязненности авиатоплива. Проблема такого выбора заключается в том, что производители фильтров предоставляют гид-

¹ Каталог: FDHB500UK 04/2010. Hannifin Corporation, 2008. 45 с.

² Velcon Contaminant Analyzer [Электронный ресурс] // Техническое описание. URL: <https://thermalsolutionsoftexas.com/pdfs/filtration/parker-velcon-clean-diesel-vca-series-contaminant-analyzer-datasheet.pdf> (дата обращения: 12.03.2025).

³ Индикатор чистоты авиационных топлив [Электронный ресурс] // Отраслевая научно-исследовательская лаборатория ОНИЛ-16. URL: <http://onil-16.ssau.ru/potokrtr.html> (дата обращения: 12.03.2025).

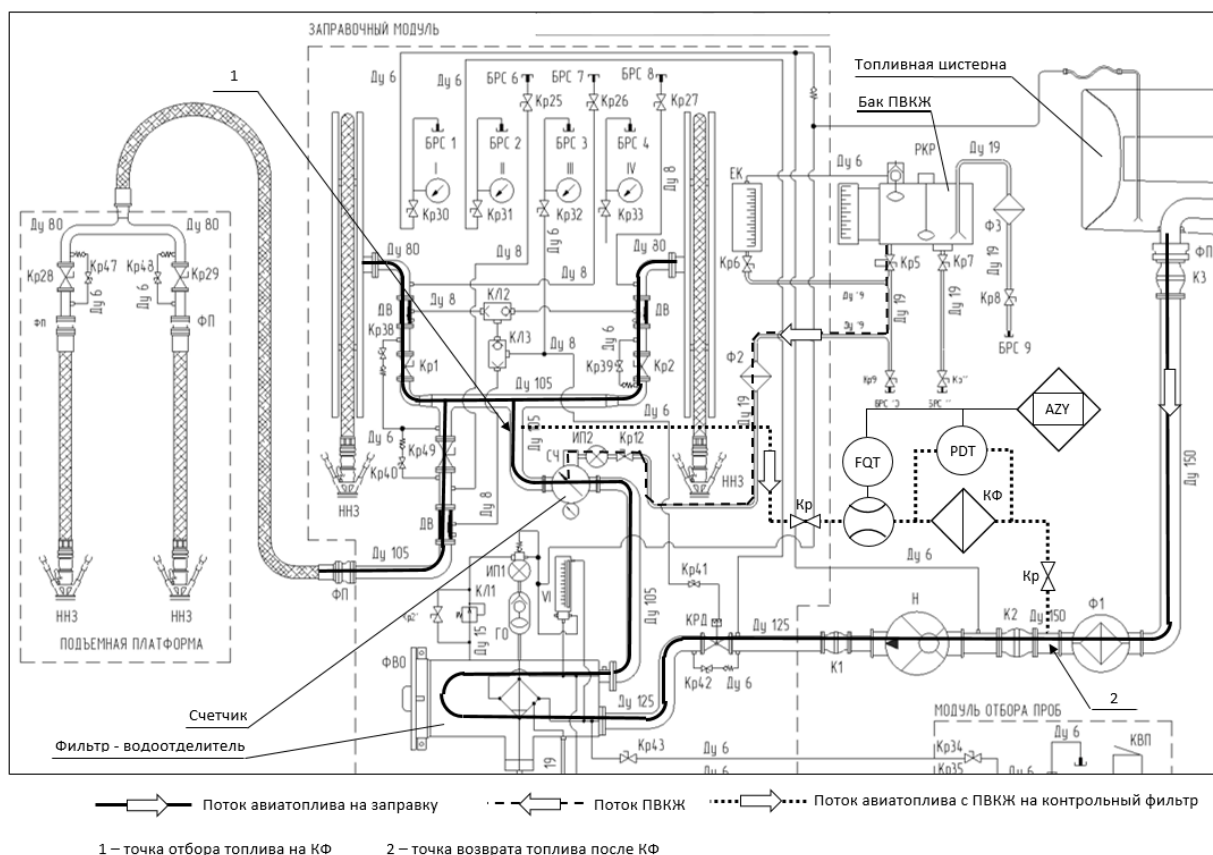


Рис. 1. Схема движения топлива и ПВКЖ в заправочном модуле с применением контрольного фильтра:
КФ – контрольный фильтр; FQ – расходомер; PDT – датчик перепада давления;
AZY – вычислительное устройство; Kp – кран.

Fig. 1. Diagram of fuel and FSII flow in a refueling module using a check filter:
КФ – Check Filter; FQ – Flow Meter; PDT – Pressure Differential Transmitter; AZY – Computing Unit; Kp – Valve

равлическую характеристику только для чистого ФЭ, снятую при испытании очищенной жидкостью, например обратноосмотической водой⁴ [9]. Поэтому получить гидравлическую характеристику частично загрязненного ФЭ можно только опытным путем.

Целью работы являлось экспериментальное определение зависимости перепада давления на ФЭ от массы загрязнителя, подведенного к единице его площади, и выбор оптимальных параметров ФЭ с использованием полученной характеристики. Наилучшим может считаться ФЭ, имеющий максимальный

ресурс при достаточной чувствительности к предельно допустимому уровню мехпримесей.

Под ресурсом в данной работе понимается объем авиатоплива, заправленного топливозаправщиком в ВС, за время использования КФ.

Чувствительность КФ определим как время, требуемое для достоверного определения браковочного уровня мехпримесей 2 г/т⁵ [10].

⁴ Глубинные фильтрующие элементы (предфильтры) марки ЭПВг.П [Электронный ресурс] // НПФ «Технофильтр»: каталог фильтрационного оборудования. URL: <https://www.technofilter.ru/catalog/patronnyefiltry/glubinnye-filtruyushchie-elementy-predfiltry/epvg-p/> (дата обращения: 12.03.2025).

⁵ Приказ Министерства транспорта РФ № ДВ-126 от 17.10.1992 г. «О введении в действие Руководства по приему, хранению, подготовке к выдаче на заправку и контролю качества авиационных горючесмазочных материалов и специальных жидкостей в предприятиях воздушного транспорта Российской Федерации» [Электронный ресурс] // ГАРАНТ. 1993. 114 с. URL: <https://base.garant.ru/71539730/> (дата обращения: 12.03.2025).



Рис. 2. Внешний вид частей фильтра: *а* – внешний вид сменных ФЭ; *б* – фильтродержатель
Fig. 2. External view of the filter components: *a* – External view of the replaceable filter elements; *b* – Filter holder

Параметры, выбираемые для КФ: номинальная тонкость фильтрации, площадь, расход авиатоплива через него, диаметр подводящего трубопровода, точность датчика дифференциального давления.

При выборе ФЭ и планировании эксперимента, были приняты во внимание следующие соображения.

1. ФЭ объемной фильтрации обладает, как правило, большей грязеемкостью по сравнению с ФЭ поверхностной фильтрации (при одинаковой номинальной тонкости фильтрации и эффективной фильтрующей площади). Однако он может отличаться большей зависимостью гидравлической характеристики, снимаемой на загрязненной жидкости, от гранулометрического состава загрязнителя.

2. Применение ФЭ с максимальным перепадом давления, несколько превышающим давление при заправке, позволяет безопасно использовать его полную грязеемкость.

3. Чем более пологая гидравлическая характеристика чистого ФЭ, тем больше диапазон располагаемой потери давления и, соответственно, больше ресурс КФ.

4. Номинальная тонкость фильтрации КФ должна быть равна или меньше номинальной тонкости фильтрации контролируемого ФВО.

5. ФЭ должен обладать совместимостью с топливами для реактивных двигателей и ПВКЖ.

6. ФЭ должен производиться в Российской Федерации.

С учетом возможности использования результатов испытаний в топливозаправщиках с производительностью от 500 до 2 500 л/мин при номинальной тонкости фильтрации 3 мкм и давлением заправки 0,35–0,38 МПа в результате анализа возможных вариантов для эксперимента были выбраны гофрированные ФЭ на основе полипропилена (рис. 2).

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

Для измерения перепада давления использовался датчик ЗОНД-20Ехi-ДД-К4И-78-(0...250)-кПа-42-0,15-(+5...+25)-СВМ-Фл-0,5МПа-ТС-1 ГОСТ 10227-2013 (–25...+35 °С) (рис. 4).

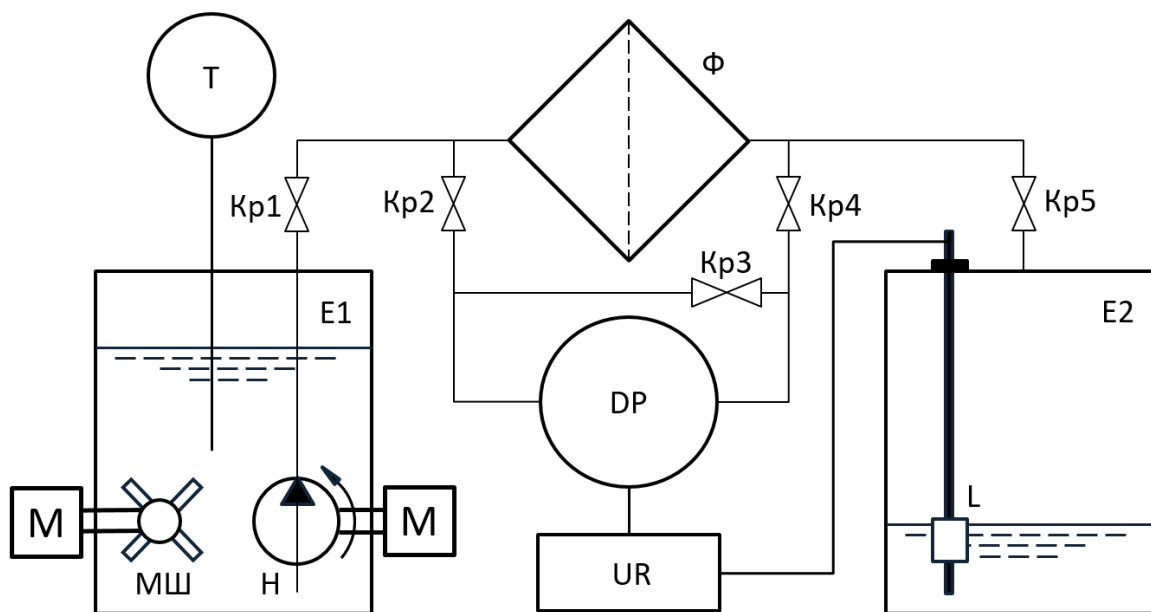


Рис. 3. Схема установки для испытаний ФЭ:

E1 – расходная емкость; *E2* – калиброванная приемная емкость; Φ – испытуемый фильтроэлемент; *DP* – датчик дифференциального давления; *L* – уровнемер поплавковый; *T* – термометр лабораторный; *UR* – видеорегистратор; *H* – насос; *MШ* – мешалка; *Kp1...Kp5* – краны

Fig. 3. Schematic diagram of the test stand for filter elements:

E1 – Supply tank; *E2* – Calibrated collection tank; Φ – Tested Filter element; *DP* – Differential pressure sensor; *L* – Float level gauge; *T* – Laboratory thermometer; *UR* – Video recorder; *H* – Pump; *MШ* – Agitator; *Kp1...Kp5* – Valves

Таблица 1
Table 1

Перечень и характеристики ФЭ,
использованных в эксперименте
List and characteristics of the filter elements
used in the experiment

Серийный номер	Номинальная тонкость фильтрации, мкм	Паспортная площадь фильтрации, м ²	Максимальное давление, МПа
291442	2,0	0,34	0,5
507955	2,0	0,45	0,5
507956	2,0	0,45	0,5
532044	2,0	0,21	0,5
532046	2,0	0,24	0,5
556624*	2,0	0,43	0,5

* Отводящий слой увеличенной жесткости.

Из условий пожарной безопасности испытания ФЭ проводились водой. При средней температуре воды в эксперименте 20 °С динамическая вязкость топлива ТС-1, вычис-



Рис. 4. Датчик дифференциального давления
Fig. 4. Differential pressure sensor

ленная по ГОСТ 10227-2013⁶ [11], и воды [11] различаются не более чем на 4 %. Поскольку

⁶ ГОСТ 10227-2013. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 34 с.



Рис. 5. Фильтр подготовки воды
Fig. 5. Water treatment filter

динамическая вязкость – единственная физическая характеристика жидкости, входящая в уравнение фильтрации (закон Дарси) [8], то такая замена тестовой жидкости представляется допустимой. Кроме того, сравнительные испытания фильтрующей способности тестируемых ФЭ водой и топливом ТС-1, выполненные изготовителем ФЭ по нашей просьбе на своей установке, показали одинаковые результаты.

Приготовление воды для испытаний производилось методом двукратной фильтрации через трехступенчатый фильтр с номинальной тонкостью фильтрации первой ступени – 10 мкм, второй ступени – 2 мкм, третьей ступени – 0,5 мкм (рис. 5).

В работах авторов [1, 12, 13] описаны источники и химический состав механических частиц, обнаруживаемых в авиатопливе на разных этапах его транспортировки, хранения, подготовки и выдачи на заправку. Данные о загрязнителях сведены в табл. 2.

В испытаниях ФЭ использовался каолин⁷ с плотностью 2,58 г/см³, являющийся распространенным загрязнителем авиатоплива и поступающий в него с атмосферным воздухом через дыхательные устройства.

При номинальной тонкости фильтрации ФВО 3 мкм в потоке топлива после неповрежденного фильтра могут находиться частицы размером 3 мкм и менее. В случае повреждения ФВО возможно наличие частиц размером более 3 мкм. В эксперименте загрязнителем служила смесь, состоящая (по массе) из 30 %

⁷ Каолин [Электронный ресурс] // Батолит: молотые и тонкодисперсные наполнители. URL: http://www.batolit.ru/154_p.shtml (дата обращения: 12.03.2025).

Таблица 2
Table 2

Перечень загрязнителей
List of contaminants

Наименование	Плотность, г/см ³
Сталь (стружка)	7,85
Закись железа FeO (вюстит) черного цвета	5,70
Закись-окись железа Fe ₃ O ₄ (магнетит) черного цвета	5,20
Окись железа Fe ₂ O ₃ (гематит) красного цвета	5,24
Песок (диоксид кремния)	2,60–1,96
Глина (каолин)	2,60
Резина МБС (износ РТИ)	1,60
Целлюлоза (волокна)	1,50
Смола фенольная	1,38–1,25
Смола акриловая	1,25–1,20
Смола эпоксидная	1,25–1,16

каолина деламинированного с номинальным размером частиц 3 мкм⁸ и 70 % каолина микронизированного с номинальным размером частиц 2 мкм⁹. Исходя из данных производителя о гранулометрическом составе каолинов, расчетный гранулометрический состав тестового загрязнителя представлен на рис. 6.

Взвешивание загрязнителя производилось на электронных весах с погрешностью 0,01 г.

⁸ Каолин деламинированный [Электронный ресурс] // Батолит: молотые и тонкодисперсные наполнители. URL: http://www.batolit.ru/157_p.shtml (дата обращения: 12.03.2025).

⁹ Каолин микронизированный [Электронный ресурс] // Батолит: молотые и тонкодисперсные наполнители. URL: http://www.batolit.ru/288_p.shtml (дата обращения: 12.03.2025).

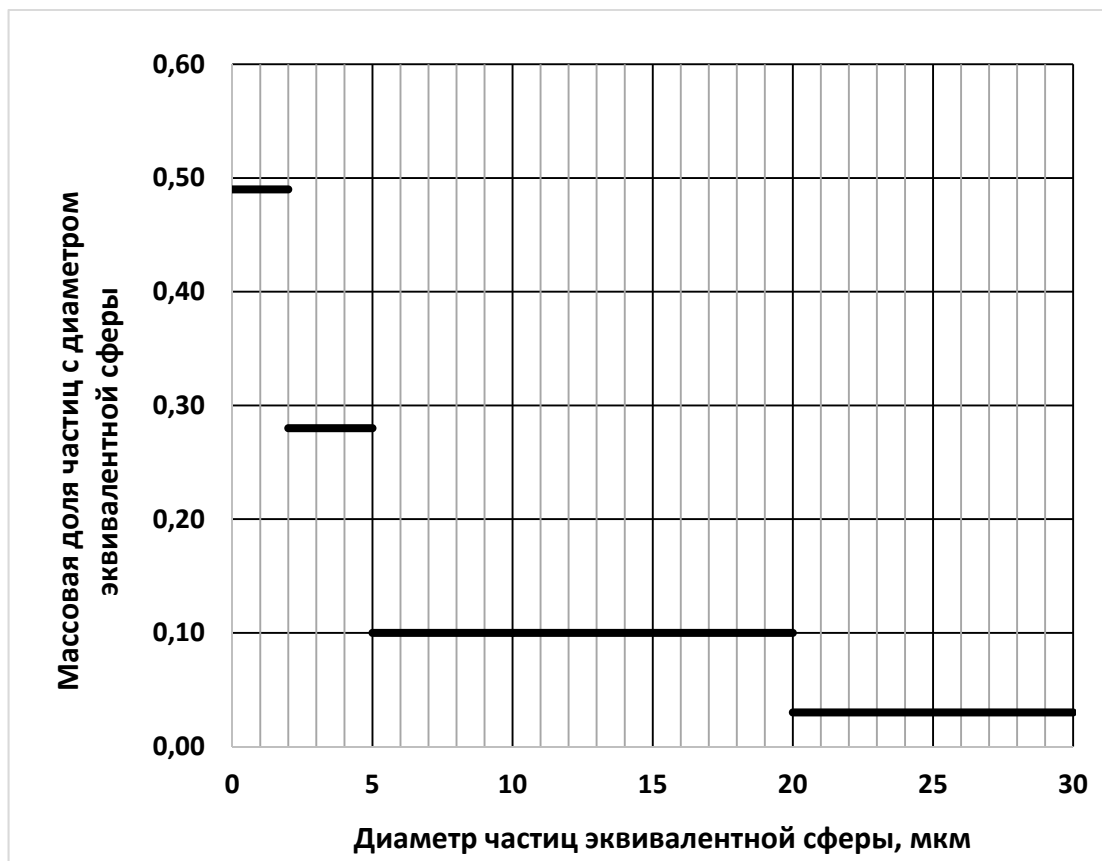


Рис. 6. Гранулометрический состав тестового загрязнителя
Fig. 6. Particle size distribution of the test contaminant

Введение загрязнителя в тестовую жидкость проводилось с учетом рекомендаций ГОСТ 14146-88¹⁰.

Расход жидкости в эксперименте был выбран из условия равенства скоростей фильтрации в опыте и на предполагаемом КФ.

Ресурс КФ обратно пропорционален расходу контрольного потока через него. Поэтому поток целесообразно снижать до предела, ограниченного репрезентативностью содержания частиц мехпримеси в единице объема.

Скорость потока в точке отбора (рис. 1) не может превышать 5 м/с. Практически для разных топливозаправщиков она составляет от 4,1 до 4,8 м/с, что соответствует числам Re в диапазоне (170 000...400 000) \gg 4 000. Следовательно, имеет место развитое турбулентное течение [11] с интенсивным перемещением

частиц жидкости поперек потока. При этом скоростной напор составляет более 13 кПа. По ГОСТ 17216-2001¹¹ и максимальный размер частиц в жидкостях 4–8-го классов чистоты, соответствующих загрязненности авиатоплива от 0,2 мг/л до 2 г/т, не должен превышать 200 мкм. Исследование [1] сепарирующих элементов ФВО топливозаправщика показало максимальный размер частиц 62 мкм. Гидродинамическая сила при скоростном напоре 13 кПа, действующая на частицу диаметром 200 мкм, составляет $\sim 0,05$ Н. Сила тяжести, действующая на такую частицу, при ее плотности 1,20...7,85 г/см³ примерно равна 0,0002...0,0007 Н, то есть не менее чем в 70 раз меньше. Следовательно, даже при горизонтальном расположении трубопровода будет происходить турбулентное перемещение частиц мехпримеси, и их концентрация

¹⁰ ГОСТ 14146-88. Фильтры очистки топлива дизелей. Общие технические устройства. М.: Издательство стандартов, 1988. 22 с.

¹¹ ГОСТ 17216-2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. М.: Стандартинформ, 2008. 15 с.

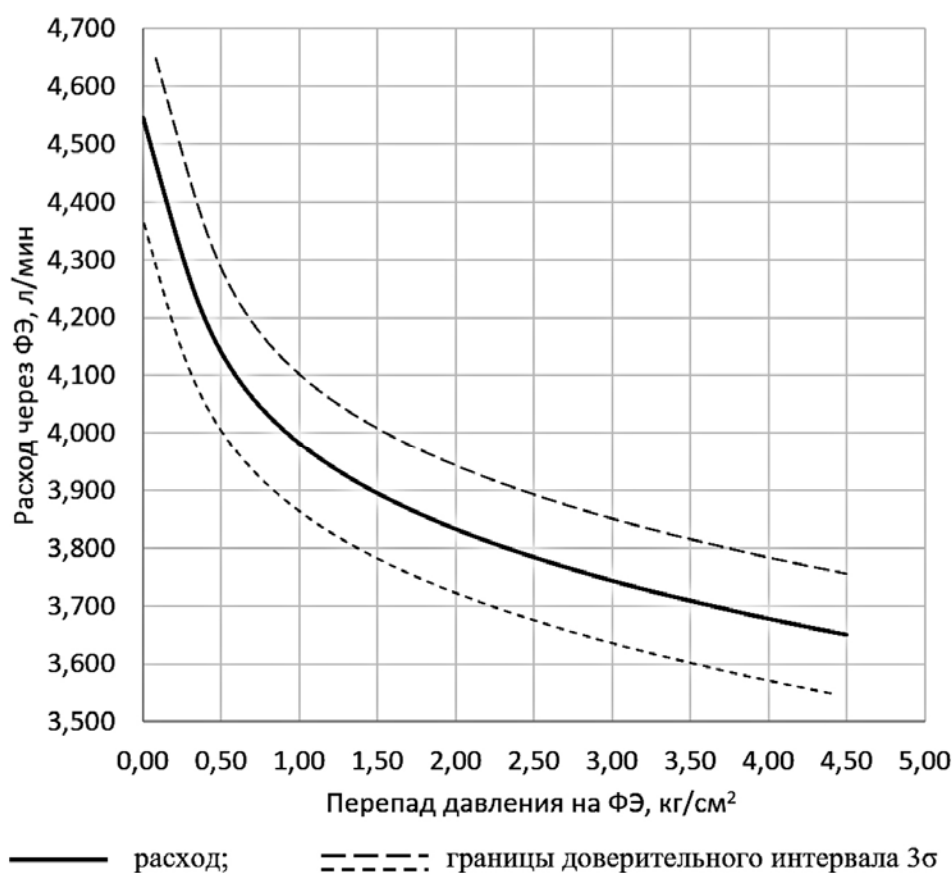


Рис. 7. Расход тестовой жидкости
Fig. 7. Test fluid flow rate

будет приблизительно одинакова во всех точках сечения трубопровода.

В соответствии с регламентом IATA¹² предупредительный уровень загрязнения авиатоплива мехпримесями равен 0,2 мг/л. Это соответствует 4–5-му классу чистоты по ГОСТ 17216-2001 пересчетом по гранулометрическому составу загрязнителя плотностью 7,85–2,60 г/см³. Таким образом, при предупредительном уровне загрязнения количество частиц размером 5 мкм и более, находящихся в 100 см³ топлива, будет составлять не менее 390...780 шт., а их общее число – на два порядка больше. Соответственно, среднее расстояние между частицами размером 5 мкм и более составит не более

6,3 мм, а для всех частиц ~ 0,1...0,2 мм. Следовательно, отбор потока на КФ трубкой с внутренним диаметром 8...12 мм должен обеспечить идентичность гранулометрического состава контрольного потока заправляемому топливу.

Минимальную скорость потока в контрольной трубке рационально ограничить числом $Re = 4\ 000$ – границей турбулентного характера потока [11], минимизирующего осаждение частиц на стенках трубки. Для диаметров 8–12 мм соответствующая скорость составит 0,6...0,4 м/с, а расход – 2...3 л/мин. Для обеспечения высокой чувствительности КФ предполагается использование ФЭ площадью 0,2 м² и менее. При этом скорость фильтрации через КФ составит не более 0,40 мм/с. В эксперименте расход жидкости находился в интервале 3,5...4,7 л/мин (рис. 7), а площадь фильтрации составляла 0,21...0,45 м², что обеспечило ту же скорость

¹²Руководство по контролю качества авиационного топлива и технологиям работ для совместных служб заправки. Изд. 10. (JIG 1). JIG Совместная инспекционная группа, 2008. 108 с.

фильтрации 0,15...0,40 мм/с, а следовательно, и гидродинамическое подобие потока взвеси в ФЭ.

Методика эксперимента заключалась в перекачивании через ФЭ тестовой жидкости известной загрязненности порциями по 170...175 л. Перекачивание заканчивалось при достижении перепада давления 4,5 кг/см². Первоначально измеряемыми величинами были:

- перепад давления (P_f , кг/см²) на ФЭ в функции времени (t , с) – $P_f(t)$;
- объем (V , л) жидкости, перекаченной через ФЭ в функции времени – $V(t)$.

Далее вычислялась масса загрязнителя, подведенная к 1 м² поверхности ФЭ (mf , г/м²) в функции времени – $mf(t)$:

$$mf(t) = V(t) \cdot mv / Sf,$$

где mv – концентрация загрязнителя, г/л; Sf – паспортная эффективная площадь ФЭ, м.

Затем строилась искомая характеристика ФЭ: масса загрязнителя, подведенная к 1 м² поверхности в функции перепада давления: $mf(P_f)$.

Дополнительно дифференцированием функции $V(t)$ методом двухсторонней разности вычислялся расход (Q , л/мин) через ФЭ.

Расшифровка измерений и расчеты выполнялись с периодом 30 с.

Перепад давления на ФЭ измерялся датчиком типа ЗОНД-20 с основной относительной погрешностью 0,15 % и диапазоном измерения 0...250 кПа. Для осуществления измерений в диапазоне 250...450 кПа и уменьшения погрешности измерения проводились по следующей схеме:

- в диапазоне (0...~230) кПа измерения производились при открытых кранах Кр2, Кр4 и закрытом Кр3 (рис. 3), то есть минусовая полость датчика была соединена с выходом ФЭ;
- при достижении перепада давления ~230 кПа Кр4 закрывался, а Кр3 открывался. В минусовую полость подавалось давление ~230 кПа, которое становилось «опорным» и запиралось закрытием Кр3 и Кр4;
- в диапазоне (230...450) кПа измерение велось при открытом кране Кр2 и закрытых Кр3, Кр4.

С целью определения потери давления на участке коммуникации между точками подсоединения датчика дифференциального давления был измерен перепад давления в отсутствие ФЭ в фильтродержателе при расходе тестовой жидкости 4,5 л/мин. Он составил $(0,40 \pm 0,12)$ кПа, что учитывалось в последующих расчетах и построении графиков.

Были испытаны ФЭ, указанные в табл. 1. Испытания ФЭ проводились при концентрациях загрязнителя (0,2; 1,0; 1,6; 50,0) г/м³. Концентрация 50 г/м³ использовалась для ускоренного построения отдельных участков характеристики $mf(P_f)$. При этом испытания других ФЭ на данных участках проводились и с концентрациями (0,2; 1,0; 1,6) г/м³.

На рис. 8 представлена зависимость удельной грязеемкости ФЭ от эффективной площади фильтрации (далее для краткости под удельной грязеемкостью понимается масса загрязнителя, подведенная к 1 м² ФЭ).

В исследованном диапазоне площадей фильтрации удельная грязеемкость ФЭ (mf , г/м²) постоянна. Влияния концентрации загрязнителя, партии фильтрующего материала и жесткости отводящего слоя ФЭ на удельную грязеемкость не выявлено.

На рис. 9 представлена зависимость удельной грязеемкости ФЭ от перепада давления.

Для безопасного применения КФ максимальное давление ФЭ должно быть несколько больше максимального давления заправки. В эксперименте использовались ФЭ с максимальным давлением 0,5 МПа.

На графике рис. 9 выделяются четыре характерные зоны:

зона I – участок линейной зависимости перепада давления и загрязненности ФЭ, по-видимому, соответствующий фильтрации с постепенным закупориванием пор ФЭ частицами примеси [8, 9];

зоны II, III и IV – нелинейный участок, соответствующий фильтрации через частично закупоренные поры и осадок.

Для зон III и IV характерна большая и близкая к постоянной скорость увеличения перепада давления при загрязнении ФЭ. Зоны I–III составляют рабочую часть характеристики КФ.

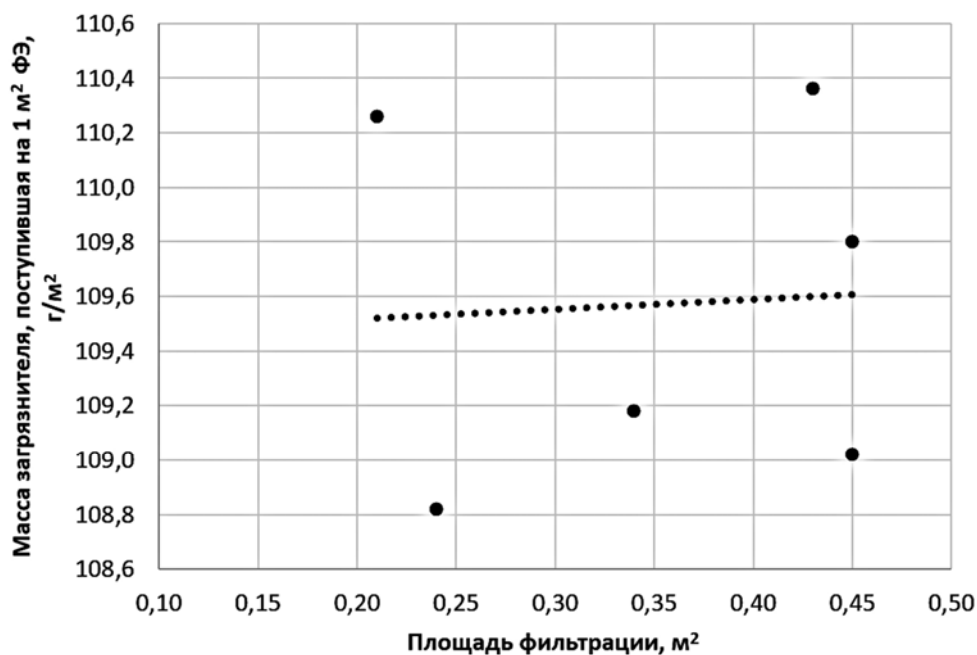


Рис. 8. Удельная грязеемкость ФЭ при потере давления 4,5 кг/см²
Fig. 8. Specific contaminant capacity of the FE at a pressure loss of 4.5 kg/cm²

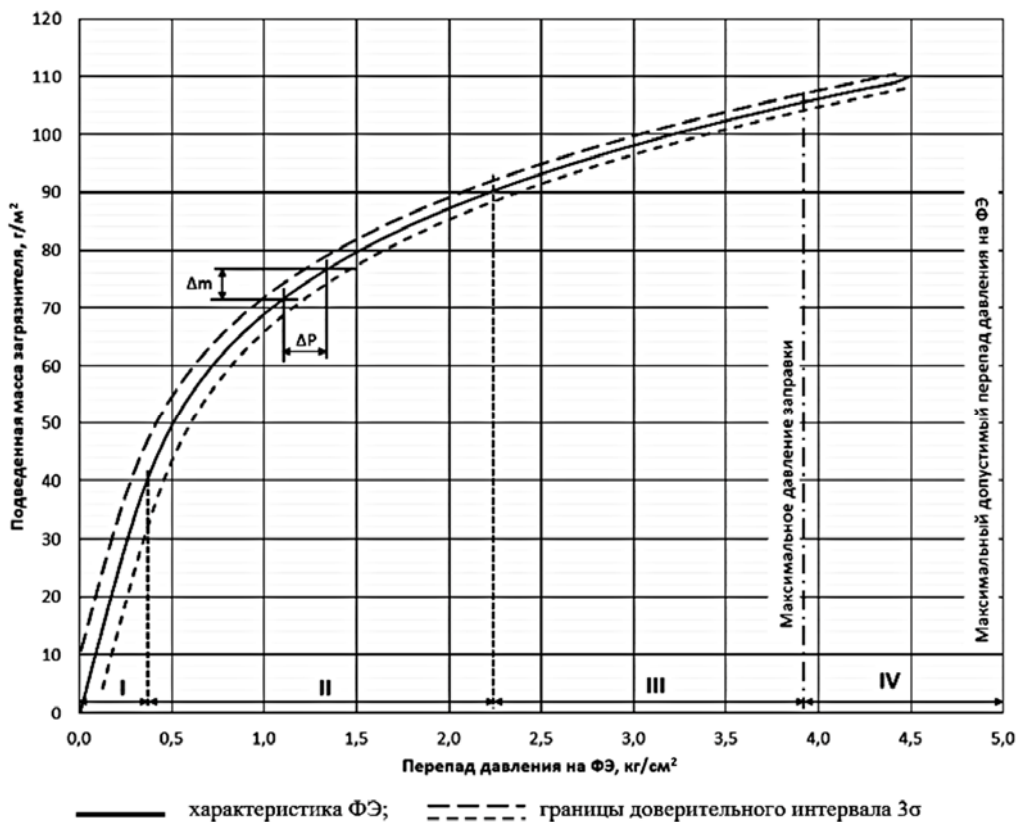


Рис. 9. Характеристика mf(Pf) ФЭ: ΔP – изменение перепада давления на ФЭ за время Δt;
Δm – изменение массы загрязнителя, подведенного к 1 м² ФЭ
Fig. 9. Filter element characteristic mf (Pf): ΔP – Change in the pressure differential across the FE over time Δt;
Δm – Change in the mass of contaminant supplied to 1 m² of the filter element

Таблица 3
Table 3

Погрешности измерений
Measurement Errors

Наименование	Разм.	Величина
<i>Измерение перепада давления на ФЭ</i>		
Среднеквадратичное абсолютных отклонений σ	кПа	2,61
Интервал 3σ с доверительной вероятностью 0,997	кПа	7,83
Максимальная по модулю величина отклонения от наилучшей (аппроксимирующей) кривой	кПа	7,36
Отношение 3σ к диапазону измерения	%	3,13
<i>Измерение объема тестовой жидкости</i>		
Среднеквадратичное абсолютных отклонений σ	л	0,694
Интервал 3σ с доверительной вероятностью 0,997	л	2,083
Максимальная по модулю величина отклонения от наилучшей (аппроксимирующей) кривой	л	1,409
Отношение 3σ к диапазону измерения	%	1,23

Таблица 4
Table 4

Инструментальные погрешности измерений
Instrumental measurement errors

Наименование	Разм.	Величина
Абсолютная погрешность измерения времени (t)	с	0,10
Абсолютная погрешность измерения массы загрязнителя (m)	г	0,01
Абсолютная погрешность измерения температуры тестовой жидкости (T)	°C	1,00
Основная абсолютная погрешность измерения давления (Pf0)	кПа	0,38
Дополнительная (температурная) абсолютная погрешность измерения давления (PT)	кПа	0,11
Абсолютная погрешность датчика давления: $P_f = P_{f0} + P_T$	кПа	0,49
Абсолютная погрешность измерения уровня (L)	мм	1,00
Абсолютная погрешность измерения объема (V)	л	0,20

Загрязнение к концу линейной зоны I составляет по результатам проведенных экспериментов 34–38 % от грязеемкости испытуемых ФЭ. Использование только линейной зоны при применении КФ, ограничивает ресурс его применения по грязеемкости в 2,5–3,0 раза.

Полученная зависимость (рис. 9) аналогична результатам, приведенным в [14].

Среднеквадратичные погрешности измерений перепада давления и объема тестовой жидкости, вычисленные по методике авторов [15], приведены в табл. 3.

Инструментальные погрешности измерений, определенные по методике авторов¹³, показаны в табл. 4.

Ошибки вычислений удельной грязеемкости и расхода, определенные по [16], показаны в табл. 5.

¹³ Преобразователи измерительные (датчики) давления серии ЗОНД-20. Модели К1, К2, К3, К4, К4И, К6, К7, К7И, К9, К10, К11: руководство по эксплуатации ГКНД.406233.008 РЭ. Часть 1. М.: Гидрогазприбор, 2017. 65 с.

Таблица 5
Table 5

Ошибки вычислений
Computation Errors

Наименование	Разм.	Величина
Погрешность вычисления концентрации загрязнителя: $mv = m / V$	г/м ³	0,12
Погрешность вычисления загрязненности ФЭ площадью S: $mf = V(t) \cdot mv / S$	г/м ²	0,86
Погрешность вычисления расхода тестовой жидкости: $Q = dV(t) / dt$	л/мин	0,10

Обозначим:

ρ – плотность топлива, кг/м³;

S_f – площадь КФ, м²;

mf – удельную грязеемкость КФ, г/м²;

M_f – грязеемкость КФ, г;

mv – среднюю концентрацию мехпримесей в топливе, г/м³;

Q – средний расход топлива через КФ, м³/с;

Q_1 – среднюю скорость заправки ВС, м³/с;

T – ресурс КФ, ч;

R – ресурс КФ, тыс. тонн топлива, заправленного в ВС.

Грязеемкость КФ может быть выражена следующими отношениями:

$$M_f = mf \cdot S_f = mv \cdot Q \cdot T \cdot 3600,$$

из которых можно определить ресурс КФ:

$$T = \frac{mf \cdot S_f}{mv \cdot Q \cdot 3600} \quad (1)$$

и

$$R = 0,0036 \cdot Q_1 \cdot \rho \cdot T. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что на увеличение ресурса КФ можно влиять увеличением его площади и уменьшением расхода через него.

Обозначим:

ΔP – абсолютную погрешность измерения перепада давления на КФ, кПа;

Δm – количество мехпримеси, подведенной на 1 м² КФ, г/м² при изменении перепада давления на нем на величину ΔP (рис. 9);

Δt – интервал времени, с, за который происходят изменения ΔP и Δm ;

mv_1 – браковочный предел загрязненности авиатоплива, г/м³;

$\frac{dm_f}{dP_f} = D_{mp}$ – производную кривой $mf(P_f)$ (рис. 9);

ΔM – количество мехпримеси, подведенной к КФ, г при изменении перепада давления на нем на величину ΔP (рис. 9).

Количество мехпримеси, подведенной к КФ за время Δt , может быть выражено следующими отношениями:

$$\Delta M = D_{mp} \cdot \Delta P \cdot S_f = Q \cdot \Delta t \cdot mv_1, \quad (3)$$

откуда может быть определена чувствительность КФ:

$$\Delta t = \frac{D_{mp} \cdot \Delta P \cdot S_f}{Q \cdot mv_1}. \quad (4)$$

Чувствительность КФ тем лучше, чем меньше время Δt . В соответствии с (4) чем меньше погрешность датчика дифференциального давления, меньше площадь фильтрации и больше расход через КФ, тем выше чувствительность. Следует отметить, что площадь фильтрации и расход влияют на ресурс (1) и чувствительность (4) КФ соответственно.

С использованием экспериментальной зависимости $mf(P_f)$ (рис. 9) и формул (1), (2), (4) было проведено параметрическое исследование по выбору наилучших параметров КФ. На рис. 10 приведена зависимость чувствительности и ресурса КФ с использованием исследованных ФЭ. Для наглядности ресурс

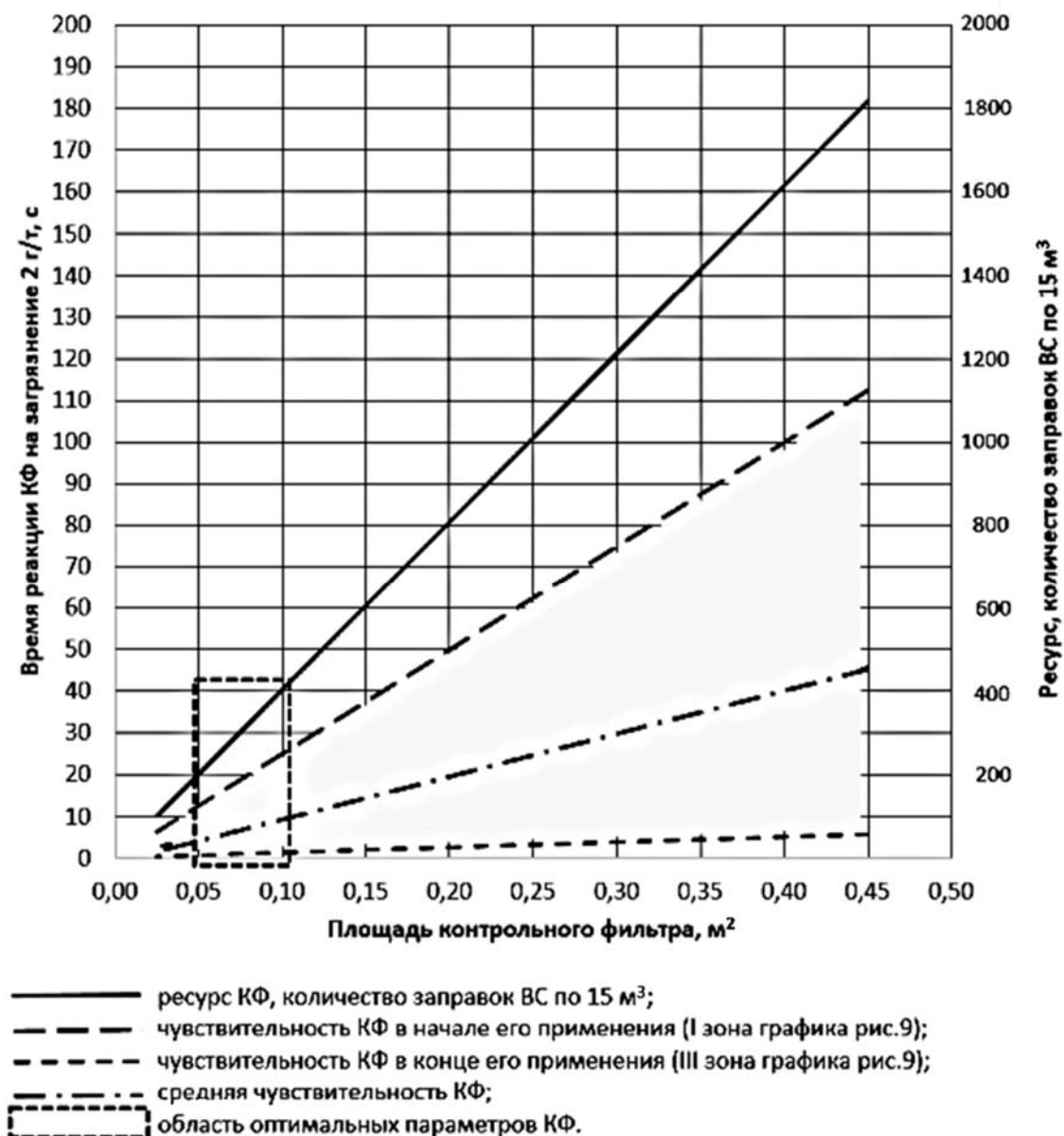


Рис. 10. Зависимость ресурса и чувствительности КФ от площади фильтрации
 Fig. 10. Dependence of the check filter service life and sensitivity on the filtration area

выражен в количестве заправок ВС объемом по 15 м³. Вычисления для графиков рис. 10 и 11 выполнены для среднего расхода через КФ, равного 4 л/мин; скорости заправки 1 200 л/мин; браковочного уровня 2 г/т и датчика давления ЗОНД-20 код 73 со шкалой 2,5 кПа, основной погрешностью 0,15 %, для температуры топлива -40...+40 °С.

На малозагрязненном ФЭ (зона I, рис. 9) перепад давления изменяется при поступлении на него мехпримеси относительно медлен-

но. По мере загрязнения ФЭ (зона II, рис. 9) скорость изменения перепада давления возрастает, достигая в зоне III максимальных значений. Соответственно, время реакции КФ на предельный уровень загрязненности уменьшается с возрастанием засорения ФЭ.

Для исследованных ФЭ оптимальная площадь фильтрации составляет 0,05...0,10 м², что находится в пределах существующего производства. При этом ресурс КФ составит 200...400 заправок ВС объемом по 15 м³

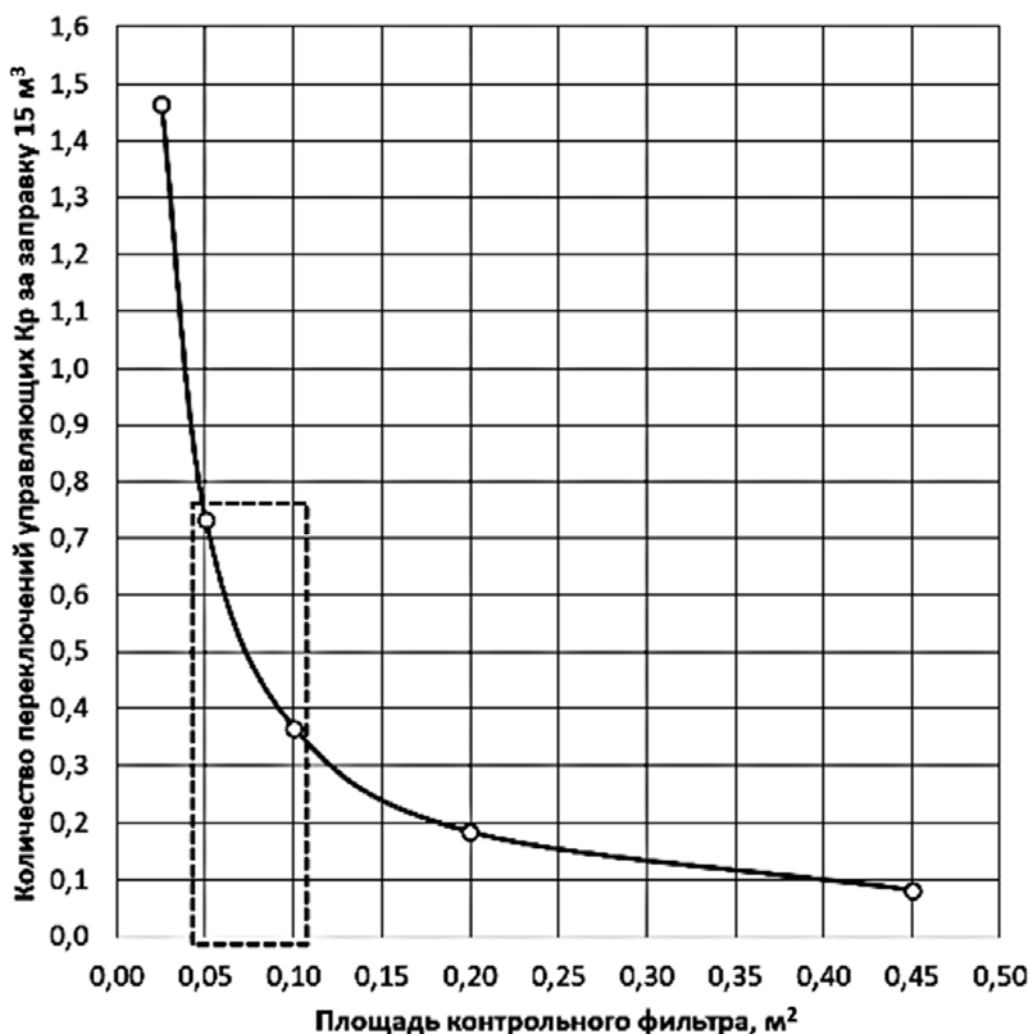


Рис. 11. Зависимость числа переключений клапанов Кр от площади фильтрации
Fig. 11. Dependence of the number of valve (V) actuations on the filtration area

(2,35...4,70) тыс. тонн, а время реакции на предельный уровень мехпримесей – не более 25,0...12,5 с, в среднем – 5...10 с.

На рис. 11 показано изменение важного для выбора КФ параметра – количества переключений клапанов Кр2, Кр3, Кр4 (рис. 3) за одну «типовую» заправку объемом 15 м³. Для исследованного ФЭ переключение клапанов потребуются не более 1 раза за заправку. Этот процесс желательно автоматизировать.

Экспериментальное изучение зависимости потери давления на ФЭ от количества мехпримеси, поданного на него, и расчеты, выполненные с использованием полученной связи, показали возможность практического применения КФ для непрерывного монито-

ринга уровня мехпримесей в авиатопливе. Определены оптимальные размеры КФ и измерительных приборов для непрерывного контроля чистоты авиатоплива по критерию ресурс – чувствительность.

Заключение

1. Доказана эффективность применения неполнопоточного контрольного фильтра для непрерывного мониторинга чистоты авиационного топлива в процессе заправки воздушных судов.

2. Установлена зависимость между перепадом давления на фильтрующем элементе и массой накопленных механических примесей.

3. Определена оптимальная площадь фильтрующей поверхности контрольного фильтра, составляющая 0,05–0,10 м².

4. Установлено, что предложенная конструкция контрольного фильтра обеспечивает:

– продолжительный ресурс работы до 200–400 заправок;

– высокую чувствительность – время обнаружения загрязнения составляет 5–10 с.

5. Подтверждена практическая возможность создания системы оперативного контроля чистоты авиатоплива с использованием контрольного фильтра.

6. Полученные результаты могут быть использованы при создании новых экспресс-методов измерений показателей промышленной чистоты авиатоплива и модернизации существующих, а также послужить основой создания новых датчиков (сенсоров) и разработки систем динамического мониторинга (непрерывной оценки) чистоты авиатоплива в цепи технологических процессов его подготовки и заправки в ВС.

7. Внедрение разработанного решения и интеграция в существующие автоматизированные системы управления технологическими процессами позволит повысить степень автоматизации технологических процессов топливозаправочного комплекса и, как следствие, уровень безопасности полетов за счет предотвращения заправки воздушных судов некондиционным топливом.

Список литературы

1. **Браилко А.А.** Метод непрерывного мониторинга чистоты авиатоплива в технологической схеме топливообеспечения воздушных судов: дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ ГА, 2018. 134 с.

2. **Браилко А.А., Дружинин Н.А., Самойленко В.М.** Устройство непрерывного мониторинга чистоты авиатоплива в технологической схеме топливообеспечения воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 6. С. 44–53. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-6-54-62

3. **Браилко А.А.** Экспериментальное исследование и оптимизация параметров непол-

ноточного контрольного фильтра для непрерывного мониторинга чистоты авиатоплива / А.А. Браилко, С.Н. Айрапетов, О.Е. Зубов, К.Э. Бальшин // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации. Москва, 18–19 мая 2023 года. М.: ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2023. С. 87–89.

4. **Тимошенко А.Н.** Метод определения продолжительности подготовки авиатоплива к применению на воздушных судах: дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ ГА, 2015. 197 с.

5. **Браилко А.А.** Устройство контроля содержания механических примесей в жидкости и система мониторинга содержания механических примесей в потоке жидкости. Патент ПМ № RU 141654 U1, МПК G01N 33/22, B01D 25/00 / А.А. Браилко, Н.А. Дружинин, Л.А. Дружинин, А.В. Смутьский, М.А. Смутьская, Н.Е. Сыроедов: опубл. 10.06.2014. 12 с.

6. **Браилко А.А.** Способ контроля содержания механических примесей в жидкостях, для его осуществления и система мониторинга содержания механических примесей в потоке жидкости. Патент № RU 2563813 C2, МПК G01N 33/22 / А.А. Браилко, Н.А. Дружинин, Л.А. Дружинин, А.В. Смутьский, М.А. Смутьская, Н.Е. Сыроедов: опубл. 20.09.2015. 15 с.

7. **Жужиков В.А.** Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1980. 400 с.

8. **Удлер Э.И.** Фильтрация углеводородных топлив / Под ред. К.В. Рыбакова. Томск: ТГУ, 1981. 152 с.

9. **Немчиков М.Л.** Исследование возможности оценки эффективности работы топливных фильтроэлементов при применении рентгенофлуоресцентного метода / М.Л. Немчиков, А.Н. Козлов, К.И. Грядунов, А.М. Мелешников // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 107–115.

10. **Блинова И.О., Миронычев Д.А., Каргин К.А.** Средства фильтрации – плано-

вый контроль // EUROPEAN RESEARCH: сборник статей XXX Международной научно-практической конференции. Пенза, 08 января 2021 года. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 17–19.

11. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

12. **Тимошенко А.Н., Грядунов К.И.** Критерии выбора параметров модельной частицы механических примесей для построения модели отстаивания авиатоплива и масел // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 206. С. 127–130.

13. **Молодницкий Р.Ю.** Расширение ассортимента технических средств очистки авиатоплива и экспресс контроля уровня его чистоты / Р.Ю. Молодницкий, Н.С. Бородин, С.И. Поплетеев, Д.Л. Савин // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 28. С. 59–70.

14. **Григорьев М.А.** Очистка масла и топлива в автотракторных двигателях. М.: Машиностроение, 1970. 270 с.

15. **Воронова Н.С.** Анализ и представление результатов эксперимента: учебно-метод. пособие / Н.С. Воронова, С.Г. Бежанов, С.А. Воронов, Е.В. Хангулян, О.Ю. Цупко, А.И. Романов; под общ. ред. Н.С. Вороновой. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 120 с.

16. **Рубцова С.В., Охрименко О.И., Алейникова О.А.** Основы теории погрешностей: учебно-метод. пособие. Шахты: ИСОИП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2019. 66 с.

References

1. **Brailko, A.A.** (2018). Method of continuous monitoring of aviation fuel purity in the aircraft fuel supply process flow chart: Cand. Sc. Thesis. Moscow: MGTU GA, 134 p. (in Russian)

2. **Brailko, A.A., Druzhinin, N.A., Samoilenko, V.M.** (2017). Device for continuous monitoring of aviation fuel purity in the aircraft fuel supply system. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 6, pp. 44–53. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-6-54-62 (in Russian)

3. **Brailko, A.A., Airapetov, S.N., Zubov, O.E., Balyshin, K.E.** (2023). Experimental

research and optimization of parameters of a partial-flow control filter for continuous monitoring of aviation fuel purity. In: *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posviashchennoy 100-letiyu otechestvennoy grazhdanskoy aviatsii*. Moscow: ID Akademii imeni N.E. Zhukovskogo, pp. 87–89. (in Russian)

4. **Timoshenko, A.N.** (2015). Method for determining the duration of aviation fuel preparation for use on aircraft: Cand. of Technical Sc. Thesis. Moscow: MGTU GA, 197 p. (in Russian)

5. **Brailko, A.A., Druzhinin, N.A., Druzhinin, L.A., Smulsky, A.V., Smul'skaya, M.A., Syroedov, N.E.** (2014). Device for monitoring the content of mechanical impurities in a liquid and a system for monitoring the content of mechanical impurities in a liquid flow. Patent PM RU no. 141654, IPC G01N 33/22, B01D 25/00: publ. June 10, 12 p. (in Russian)

6. **Brailko, A.A., Druzhinin, N.A., Druzhinin, L.A., Smul'skij, A.V., Smul'skaja, M.A., Syroedov, N.E.** (2015). Method to monitor content of mechanical impurities in fluid, device for its realisation and system of monitoring of mechanical impurities content in fluid flow. Patent RU no. 2563813 C2, IPC G01N 33/22: publ. September 20, 15 p. (in Russian)

7. **Zhuzhikov, V.A.** (1980). Filtration. Theory and practice of suspension separation. 4th ed., revised and enlarged. Moscow: Khimiya, 400 p. (in Russian)

8. **Udler, E.I.** (1981). Filtration of hydrocarbon fuels, in Rybakov K.V. (Ed.). Tomsk: TGU, 152 p. (in Russian)

9. **Nemchikov, M.L., Kozlov, A.N., Gryadunov, K.I., Meleshnikov, A.M.** (2017). Research of the possibility of assessing the performance of fuel filter elements using the X-ray fluorescence method. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 107–115. (in Russian)

10. **Blinova, I.O., Mironychev, D.A., Kargin, K.A.** (2021). Filtration means – scheduled control. In: *EUROPEAN RESEARCH: sbornik statey XXX Mezhdunarodnoy nauchno-prakti-*

cheskoy konferentsii. Penza: Nauka i Prosveshcheniye, pp. 17–19. (in Russian)

11. Idelchik, I.Ye. (1992). Handbook of hydraulic resistance, in Shteinberg M.O. (Ed.). 3rd ed., revised and enlarged. Moscow: Mashinostroyeniye, 672 p. (in Russian)

12. Timoshenko, A.N., Gryadunov, K.I. (2014). Contamination particle parameters choice criteria for aviation fuel and oil sedimentation modeling. *Nauchnyy vestnik MSTU GA*, no. 206, pp. 127–130. (in Russian)

13. Molodnitskiy, R.Yu., Borodina, N.S., Popleteev, S.I., Savin, D.L. (2019). Expansion of the range of technical means of jet fuel purification and express control of its purity level. *Scientific Bulletin of the State Scientific Re-*

search Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 28, no. 59–70. (in Russian)

14. Grigoryev, M.A. (1970). Oil and fuel purification in automotive and tractor engines. Moscow: Mashinostroyeniye, 270 p. (in Russian)

15. Voronova, N.S., Bezhanov, S.G., Voronov, S.A., Khangulyan, E.V., Tsupko, O.Yu., Romanov, A.I. (2015). Analysis and presentation of experimental results: Tutorial, in Voronova N.S. (ed.). Moscow: NIYaU MIFI, 120 p. (in Russian)

16. Rubtsova, S.V., Okhrimenko, O.I., Aleinikova, O.A. (2019). Fundamentals of error theory: Tutorial. Shakhty: ISOiP (filial) DGTU v g. Shakhty, 66 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Браилко Анатолий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, a.brailko@mstuca.ru.

Айрапетов Сергей Николаевич, главный конструктор, Чжецзянский институт турбинного оборудования и двигательных систем, sayrapetov@yandex.ru.

Савушкин Сергей Александрович, старший преподаватель кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, s.savuschkin@mstuca.ru.

Балышин Кирилл Эдуардович, старший преподаватель кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, k.balyshin@mstuca.ru.

Пархачева Ирина Викторовна, аспирант кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, i.parhacheva@mstuca.ru.

Information about the authors

Anatoly A. Brailko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.brailko@mstuca.ru.

Sergey N. Ayrapetov, Chief Designer, Zhejiang Institute of Turbine Equipment and Propulsion Systems, sayrapetov@yandex.ru.

Sergey A. Savushkin, Senior Lecturer of Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.savuschkin@mstuca.ru.

Kirill E. Balyshin, Senior Lecturer of Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, k.balyshin@mstuca.ru.

Irina V. Parkhacheva, Postgraduate Student of Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, i.parhacheva@mstuca.ru.

Поступила в редакцию	15.10.2025	Received	15.10.2025
Одобрена после рецензирования	24.11.2025	Approved after reviewing	24.11.2025
Принята в печать	26.03.2026	Accepted for publication	26.03.2026