

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА**А.А. Александров**

aaa@bmstu.ru

В.А. Девисилов

devisilov@bmstu.ru

Н.П. Фролов

login1619@list.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Проблемы эффективного использования фильтров связаны с ограниченным ресурсом их работы и необходимостью периодической регенерации при достижении максимально допустимого перепада давления на фильтровальной перегородке. Для увеличения ресурса работы предложены гидродинамические фильтры, сочетающие в себе ряд механизмов отделения твердой фазы, в частности, гидродинамическая сепарация за счет центробежных сил и смыва твердого осадка и фильтрования через проницаемую перегородку. Существует необходимость расчетного определения ресурса работы фильтров такого типа в зависимости от режимных параметров и характеристик очищаемой среды. На основе программного гидродинамического комплекса разработана расчетная модель для определения изменения перепада давления на фильтровальной перегородке с течением времени по мере нарастания осадка твердых загрязнений. Для оценки адекватности расчетной модели экспериментально определено увеличение перепада давления, тем самым подтверждены результаты расчетов. Разработан и создан экспериментальный стенд для испытаний, позволяющий проводить исследования в широком диапазоне режимных параметров фильтра и характеристик очищаемой среды. Выявлено удовлетворительное совпадение результатов экспериментов и расчетных данных. Проведена верификация предложенного машинного моделирования для определения перепада давления на фильтровальной перегородке, что позволяет прогнозировать ресурс работы фильтра, выбор режимных и конструктивных параметров, а также циклов фильтрования и регенерации

Ключевые слова

Фильтрование, фильтры, ресурс работы, машинное моделирование, перепад давления

Поступила 28.02.2025

Принята 13.05.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. Очистка жидкостей и газов от нерастворимых загрязнений за счет фильтрования является одним из основных процессов многих технологий. Фильтрование — первый этап перед очисткой сред от растворимых загрязнений с помощью сорбционных, ионообменных и других методов. Фильтрование широко применяется в технологиях защиты окружающей среды для обеспечения экологической и промышленной безопасности, надежности и безопасности производственных процессов, а также качества выпускаемой продукции [1].

Проблема очистки жидких сред актуальна для многих отраслей промышленности, особенно для сильно загрязненных и вязких сред. Проблема состоит в том, что при очистке таких сред фильтровальный материал быстро загрязняется, увеличивается перепад давления, что приводит к росту энергетических затрат и разрушению фильтровальной перегородки (ФП). Очистка ФП при регенерации не всегда возможна, поскольку не обеспечивается полного восстановления пропускной способности и через определенное число циклов регенерации требуется замена фильтровального материала. Это сложно, необходимы приостановка работы фильтровальных систем или их дублирование [2].

Для повышения ресурса работы фильтра до этапа регенерации разработаны и применяются самоочищающиеся фильтры [3–6]. В таких фильтрах осадок загрязнений смывается с перегородки скоростным потоком, перепускаемым вдоль нее, а также благодаря предварительной сепарации твердых загрязнений центробежными силами при вращении ФП [7]. Разработаны и выполнены расчетные и экспериментальные исследования гидродинамических фильтров (ГДФ) [8, 9], ресурс работы которых увеличивается вследствие сочетания центробежной сепарации и перепуска небольшого количества очищаемой среды вдоль ФП. В результате значительная часть твердой фазы не достигает ФП, а выносится перепускаемым потоком. Фильтровальная перегородка отфильтровывает более мелкие частицы, которые не были отделены центробежной сепарацией. Отметим, что, в отличие от фильтрующих центрифуг [10], очищаемый поток подается на ФП не с внутренней стороны, а с внешней, что обеспечивает действие центробежных сил.

В настоящее время разработаны расчетные модели и выполнено машинное моделирование сепарационных процессов, адекватность которых подтверждена экспериментально [11–13]. Это позволяет рассчитывать эффективность центробежной сепарации и перепад давления на ФП без учета накопленного на нем осадка твердых загрязнений, а также выбирать режимы работы ГДФ.

Однако до сих пор не решена проблема оценки ресурса работы ГДФ, которая учитывала бы накопление на ФП осадка твердых загрязнений, которые не были отделены центробежными силами. В связи с этим трудно выбирать режимы длительности работы фильтра, подбирать насосное оборудование и проектировать периоды регенерации.

Цель настоящей работы — создание расчетной модели определения процесса увеличения перепада давлений на ФП с учетом формирования на ней слоя осадка. Ввиду сложности гидродинамических процессов, наличия вихревых течений создание аналитической расчетной модели затруднительно. Решение поставленной задачи осуществлялось на основе графоаналитической модели и ее применения при численном решении уравнения Навье — Стокса с использованием программного комплекса гидродинамических расчетов ANSYS CFX.

Расчетная графоаналитическая модель. Гидродинамический фильтр (рис. 1) конструктивно состоит из четырех основных частей: трех патрубков 1–3 для подвода загрязненной жидкости, отвода концентрата и отвода очищенной жидкости соответственно и вращающейся цилиндрической ФП 4.

Основные геометрические размеры экспериментального образца фильтра и расчетной области, используемой при создании графоаналитической модели, следующие: высота фильтра 186 мм; внешний диаметр ФП 21 мм; толщина ФП 1 мм; диаметры меньшей и большей цилиндрических частей 52 и 90 мм; диаметры входного и выходного патрубков 15 мм. Подробное описание конструкции исследуемого аппарата и принципа его работы приведено в [14].

Приняты следующие допущения: течение среды, установившееся без учета теплообмена, ФП и образующийся осадок несжимаемые, фильтровальный материал перегородки — пористое тело с анизотропными свойствами, которые моделируются по закону фильтрации Дарси. В расчетах не учитывались силы когезии между частицами осадка и адгезии между частицами и материалом ФП.

Гидродинамика описывается трехмерными уравнениями Навье — Стокса, состоящими из уравнений неразрывности и сохранения количе-

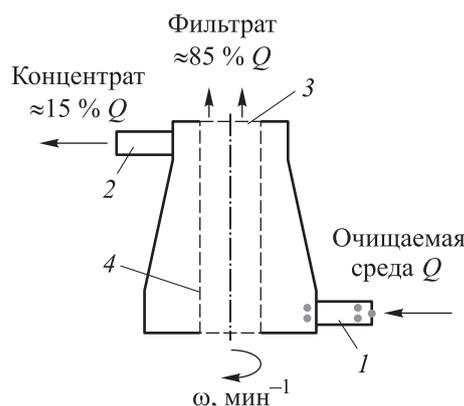


Рис. 1. Схема исследуемого ГДФ

ства движения. Для моделирования турбулентных процессов использована полуэмпирическая (k - ε)-модель турбулентности для учета влияния центробежных сил [15, 16].

Для создания геометрической модели применялись САД-системы на основе SolidWorks. В дальнейшем геометрическая модель фильтра разбивалась с помощью сетки с тетраэдрическими ячейками, ФП разбивалась на структурированную сетку с призматическими ячейками. Максимальный размер элемента составлял 1,8 мм, вся модель разбивалась на 3 115 778 ячеек. Разбиение на такую мелкую сетку позволило достичь стабильности решения (рис. 2).

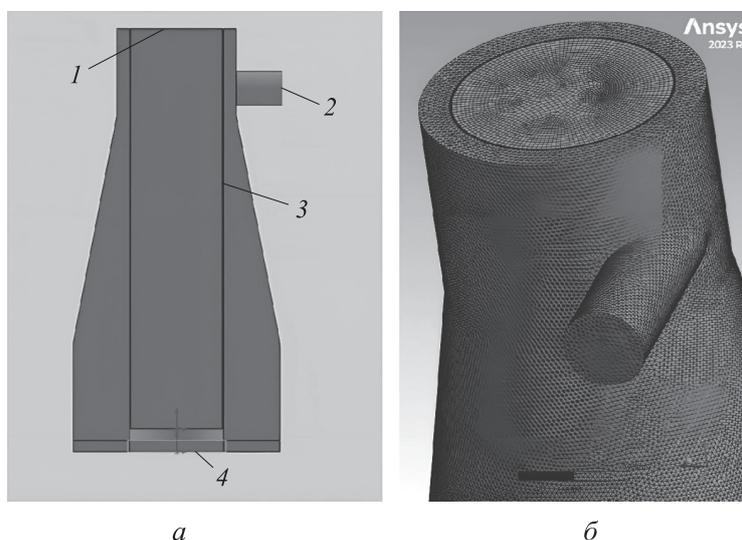


Рис. 2. Геометрическая (а) и сеточная (б) модели исследуемого аппарата:

1 — вывод очищенной жидкости; 2 — вывод концентрата; 3 — ФП;
4 — подача загрязненной жидкости

Расчеты проведены для следующих параметров: полный расход 1,9 и 4,2 л/мин; объемная концентрация механических примесей 0,05 и 0,1 %; плотность частиц 1100...3950 кг/м³; размер частиц 50...500 мкм. Скорость вращения ФП варьировалась от 0 до 700 мин⁻¹. Количество жидкости, идущей на перепуск в патрубок для отвода концентрата, 15 % полного расхода. Параметры ФП определяли в соответствии с [17]. Проницаемость ФП и слоя образующегося осадка определяли экспериментально, непосредственно на исследуемом фильтре, используя результаты из [18].

Перепад давления на фильтровальном материале определялся с помощью расчетной модели следующим образом.

1. Расчет коэффициента проницаемости фильтровального материала посредством экспериментального измерения перепада давления на чистой ФП с последующим определением пористости фильтровального материала в программе ANSYS CFX. При расчете коэффициента проницаемости данные по расходу и давлению совпадали с данными эксперимента с точностью не менее 1 % [19–21].

2. Определение эффективности сепарации для принятых значений расхода, давления и скорости вращения ФП. Задача решалась в постановке Лагранжа, что позволяет получить массовый расход частиц загрязнения на выходе очищенной жидкости и эффективность сепарации:

$$\eta = \frac{m_{\text{ВЫХ}} \cdot 100 \%}{m_{\text{ВХ}}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{ВЫХ}}$, $m_{\text{ВХ}}$ — массовый расход частиц на выходе и входе.

3. Расчет продолжительности работы аппарата до достижения необходимой толщины осадка по уравнению

$$\Delta t = \frac{LS}{Qx\eta}, \quad (2)$$

где L — толщина осадка; S — площадь ФП; Q — расход жидкости; x — объемная доля частиц в исходной жидкости; η — эффективность сепарации.

4. Определение коэффициента проницаемости слоя осадка аналогично п. 1.

5. Уточнение геометрической модели, аналогичной модели, приведенной на рис. 2, путем добавления домена для моделирования пористого слоя осадка; расчет перепада давления с помощью построенной модели [22, 23].

6. Определение скорости роста перепада давления на ФП с использованием результатов из п. 5 и времени нарастания слоя осадка из п. 3.

Экспериментальный стенд и методика испытаний. Для экспериментальных исследований спроектирован и построен гидравлический стенд (рис. 3), оснащенный современной измерительной системой.

Испытания проводятся по двум схемам: при постоянном расходе очищаемой среды с применением подачи насосом 12 объемного типа и при постоянном давлении, создаваемом вытеснительной системой подачи очищаемой среды, при которой среда подается из расходных емкостей под действием сжатого воздуха, нагнетаемого компрессором. Вытеснительная система подачи используется для испытаний на чистой жидкости, насосная — на загрязненной жидкости.

Для подготовки исходной жидкости используется емкость 1, в которой с помощью электрической мешалки 13 непрерывно перемешиваются исходная жидкость и механические примеси для равномерного распределения взвеси по объему жидкости и предотвращения ее оседания.

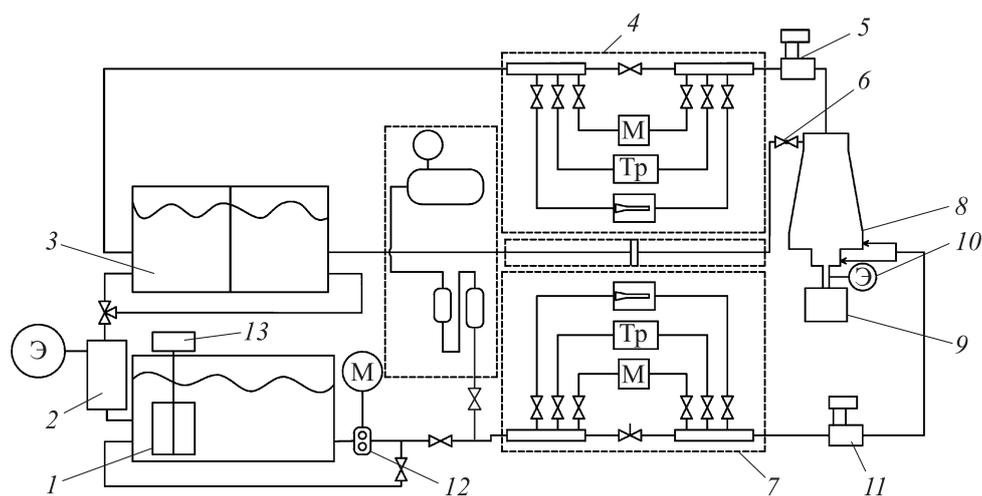


Рис. 3. Схема гидравлического стенда, оснащенного современной измерительной системой:

⊗ — электродвигатель; [М], [Тр], [] — расходомеры: магнитно-индукционный, турбинный, ротометрический

Очищаемая жидкость из емкости 1 шестеренчатым насосом 12 подается в измерительную систему и в гидродинамическом фильтре 8 очищается от механических примесей. Фильтровальная перегородка приводится во вращение электродвигателем 10 через клиноременную передачу. Электродвигатель оснащен датчиком числа оборотов.

Работа стенда возможна как по замкнутому, так и по разомкнутому контурам. При использовании замкнутого контура перекачивающая станция 2 подает очищенную в ГДФ 8 жидкость из емкости 3 в емкость 1, при этом в фильтрационно-перекачивающей станции осуществляется тонкая очистка жидкости от загрязнений, которые не были отделены в ГДФ. При работе по разомкнутому контуру очищенная жидкость выводится из системы.

Испытательный стенд снабжен вибрационным стендом фирмы TIRA, а ГДФ соединен через специальную систему с вибростолом 9 стенда TIRA. Однако в настоящей работе не приведены результаты вибрационных испытаний.

Расход жидкости определяется блоками контроля 4 и 7 расхода очищенной и исходной жидкостей. Расход жидкости без механических примесей контролируется турбинным расходомером EVS 3118, расход жидкости с механическими примесями — магнитно-индукционным расходомером Dwyer MFS-11. Концентрация частиц загрязнений в очищаемой и очищенной среде измеряется либо непосредственно в потоке анализаторами FCU 2000 и CS 2000 11, 5, либо путем отбора проб до и после фильтра и их анализом с помощью прибора «Фотон-965».

Расход концентрата регулируется вентилем 6. Перепад давления на фильтре автоматически записывается двумя датчиками давления Hydac HDA 4748-H-0009-000, установленными на входе и выходе из фильтра, и регистратором данных HMG 3000 с интервалом 0,1 с.

Объекты и материалы исследования. При исследовании в качестве исходной жидкости с плотностью 997 кг/м^3 и динамической вязкостью $10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ использовалась вода, в качестве механических примесей применялись два типа экспериментальных частиц: кварцевый песок и электрокорунд (рис. 4) и один тип модельных частиц. Характеристики экспериментальных и модельных частиц приведены в таблице.

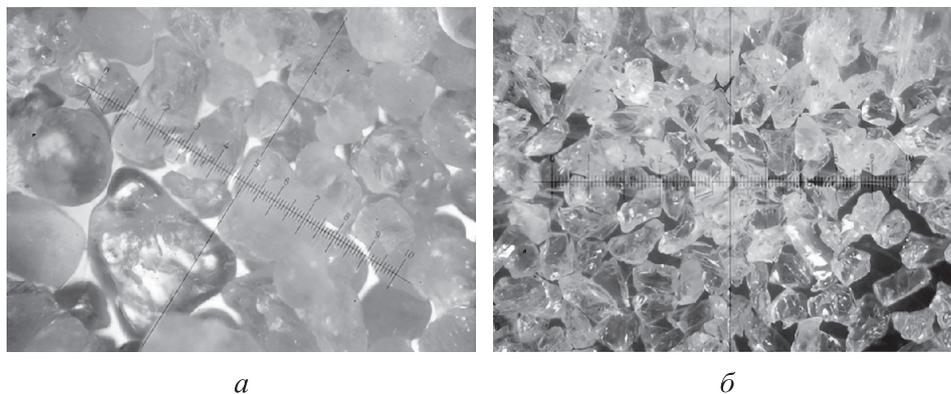


Рис. 4. Частицы кварцевого песка (а) и электрокорунда (б), цена деления 0,025 мм

Характеристики экспериментальных и модельных частиц

Примесь	Коэффициент проницаемости, м^2	Плотность, кг/м^3
Кварцевый песок	$1,3 \cdot 10^{-14}$	2500
Электрокорунд	$3,2 \cdot 10^{-14}$	3950
Модельная частица	10^{-14}	1100

В качестве материала ФП применялся проницаемый материал, полученный методом горячей прокатки в вакууме на основе металлических сеток, так называемых комбинированных пористых сетчатых металлов [24], с толщиной очистки 10 мкм.

Результаты и обсуждение. Результаты численных расчетов и эксперимента на чистой жидкости приведены на рис. 5.

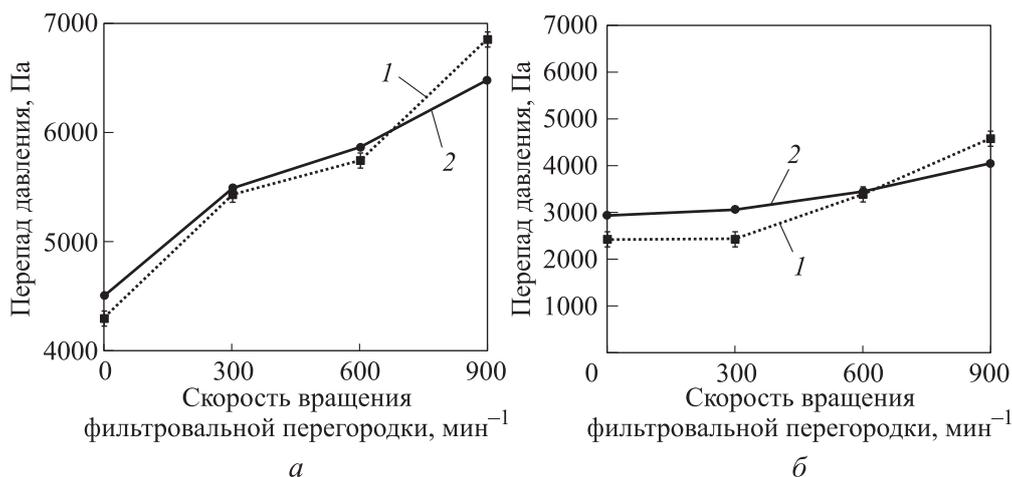


Рис. 5. Результаты эксперимента (1) и расчетов (2) на чистой жидкости при расходе 1,9 (а) и 4,2 л/мин (б)

В результате расчетов и экспериментов выявлена хорошая сходимость расчетных и экспериментальных значений, разность между ними составляет 0,6...15,0 %. Увеличение до 900 мин⁻¹ скорости вращения ФП приводит к увеличению в 1,5 раза перепада давления, однако в абсолютных величинах перепад давления составляет всего несколько килопаскалей.

Результаты экспериментов и численных расчетов на жидкости с механическими примесями приведены на рис. 6.

Расчеты и эксперименты (см. рис. 6) проводились следующим образом: в течение времени изменялась скорость вращения ФП и фиксировалась интенсивность нарастаний перепада давления. Вертикальными прямыми разделены области с различной скоростью вращения ФП. При объемной доле загрязнений 0,1 % (рис. 6, а) наблюдается выраженное увеличение скорости роста перепада давления при отключении скорости вращения ФП. При скорости вращения ФП 450 мин⁻¹ скорость роста перепада давления уменьшается в 10 раз по сравнению с неподвижной перегородкой.

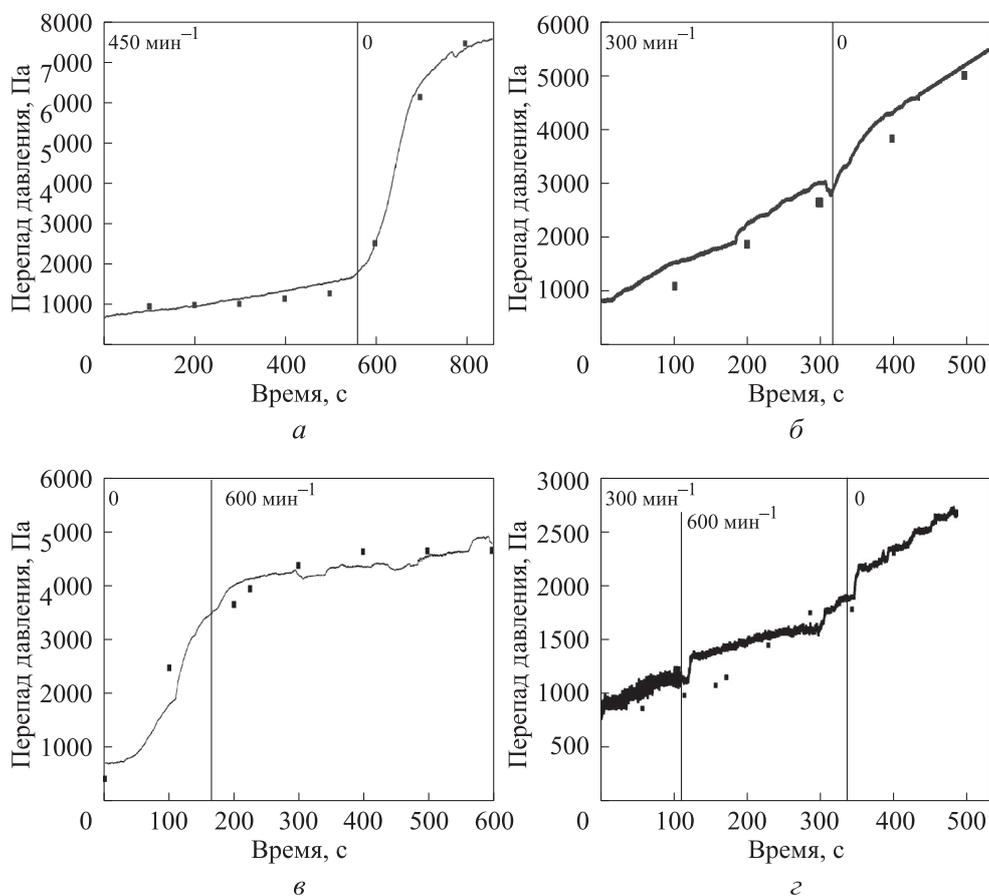


Рис. 6. Результаты численных расчетов (■) и экспериментов (—) на загрязненной жидкости с объемной концентрацией загрязнений 0,1 (а) и 0,05 % (б-з), расходом 4,2 (а) и 1,9 л/мин (б-з), плотностью частиц 2500 (а-в) и 3950 кг/м³ (з), размером частиц 500...800 (а-в) и 200...250 мкм (з)

Отметим, что увеличение от 0 до 600 мин⁻¹ скорости вращения ФП позволяет уменьшить в 10 раз скорость нарастания перепада давления на фильтровальном материале при очистке жидкости с объемной концентрацией примесей 0,05 % для частиц размером 500...800 мкм и в 5 раз для частиц размером 200...250 мкм. Для достижения такого эффекта при работе с жидкостью с объемной концентрацией загрязнений 0,1 % достаточно скорости вращения ФП 450 мин⁻¹. Совпадение экспериментальных и расчетных данных лежит в пределах 15 %.

На основании предложенной расчетной модели и данных эксперимента рассчитывается ресурс работы фильтра для загрязняющих веществ различной дисперсности и при разных режимных параметрах. Ресурс определяется как время достижения перепада давления 0,5 МПа на аппарате.

Расчеты проводились для частиц девяти типов, варьировались плотность частиц от 1100 до 3950 кг/м³ и размер частиц от 50 до 500 мкм. Результаты расчетов приведены на рис. 7.

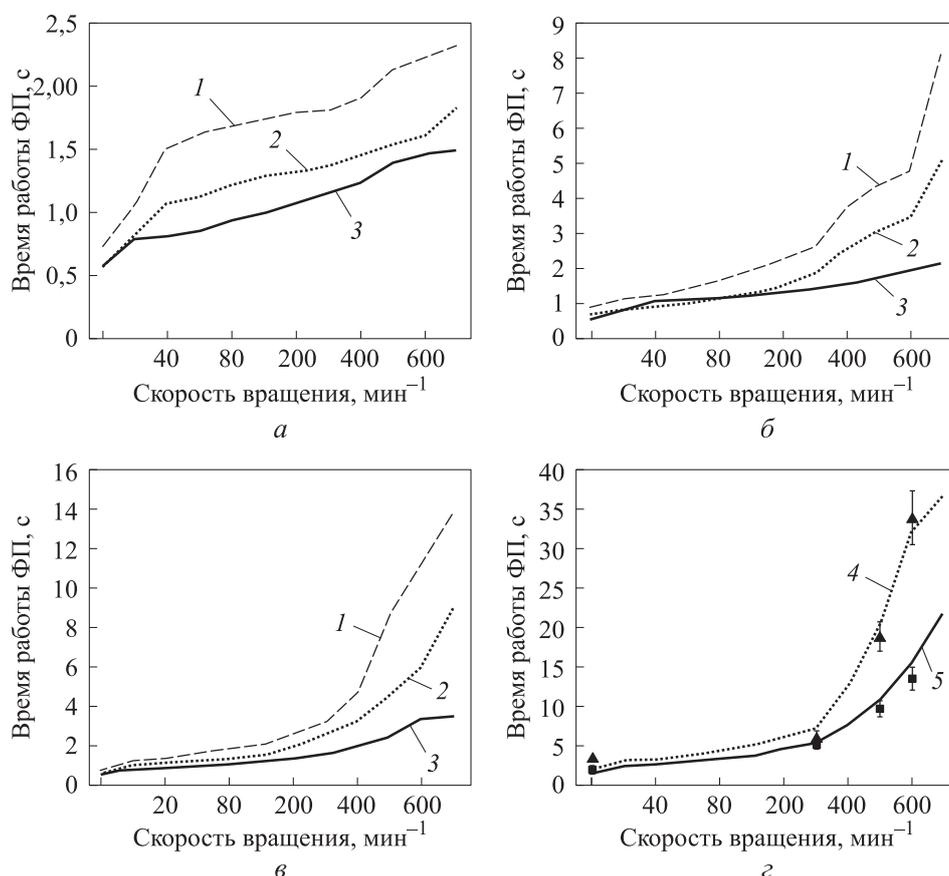


Рис. 7. Зависимости времени работы ФП от скорости ее вращения до достижения перепадов давлений 500 кПа для частиц плотностью 3950 (1), 2500 (2), 1100 кг/м³ (3), размером 50, 500, 250 мкм (а–в) и 20 кПа для частиц размером 500 мкм (г); эксперимент (▲) для частиц плотностью 2500 кг/м³ (4) размером 500...800 мкм; эксперимент (■) для частиц плотностью 3950 кг/м³ (5) размером 200...250 мкм

Для частиц размером 50 мкм рост скорости вращения ФП до 700 мин⁻¹ увеличивает время работы аппарата в 2,5–3,5 раза. Для частиц размером 250 и 500 мкм наблюдается резкое увеличение времени работы аппарата при скорости вращения ФП 400...500 мин⁻¹. При скорости вращения ФП 700 мин⁻¹ время работы увеличивается в 5–10 раз для частиц размером 250 мкм и 6–20 раз для частиц размером 500 мкм. Расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет не более 15 %.

В результате экспериментального исследования ГДФ выявлены взаимосвязи между перепадом давления и условиями фильтрации. Показано, что вращение ФП увеличивает эффективность отделения механических примесей от жидкостей, что повышает ресурс работы аппарата. На это указывают измеренные перепады давления, которые варьировались в зависимости от режима работы и концентрации загрязняющих веществ. Выявлена зависимость роста перепада давления от времени и условий фильтрации, которая позволяет предположить, что оптимизация этих параметров может привести к увеличению ресурса работы.

Математическое моделирование с использованием закона Дарси обеспечило теоретическую основу, которая хорошо согласуется с результатами экспериментов. Численное моделирование, проведенное с помощью ANSYS CFX, подтвердило прогнозы, сделанные на основе теоретических расчетов, продемонстрировав высокую степень точности (отклонение не более 15 %) между экспериментальными и расчетными данными. Эта проверка указывает на надежность предложенной математической модели для прогнозирования поведения процесса гидродинамической фильтрации.

Заключение. Результаты расчетного и экспериментального исследований работы ГДФ указывают на применимость ГДФ для увеличения ресурса работы. Предварительная сепарация частиц твердых загрязнений большей плотности, чем очищаемая жидкость, за счет воздействия центробежных сил и удаления отсепарированных частиц перепускаемым потоком позволяет значительно сократить скорость увеличения слоя осадка на ФП и, соответственно, увеличения перепада давления. Разработанная численная схема расчета перепада давления на ФП с применением программного комплекса проверена в серии испытаний и показала удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. В результате расчетов определена зависимость эффективности предварительной сепарации от таких характеристик, как вязкость очищаемой среды, размер и плотность материала частиц загрязнения, режимных параметров работы ГДФ, прежде всего скорости вращения ФП и объема перепускаемой среды. Это позволяет в зависимости от указанных характеристик очищаемой среды на этапе проектирования выбирать требуемые режимные параметры работы, определять допустимое время работы до регенерации или замены фильтровального материала.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ильющенко А.Ф., Черняк И.Н., Жегздринь Д.И. и др. Регенерация порошковых фильтрующих элементов в процессе фильтрации водной суспензии гидрогумата торфа. *Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК. Матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Белагро-2018»*. Минск, БГАТУ, 2018, с. 168–172.
- [2] Камалетдинов Р.С., Лазарев А.Б. Обзор существующих методов борьбы с мехпримесями. *Инженерная практика*, 2010, № 2, с. 6–13.
- [3] Мочалин Е.В., Мочалина И.Г. Эффективность сепарации взвешенных примесей вращающимся фильтроэлементом. *Вестник НТУ ХПИ*, 2011, № 10, с. 3–9.
- [4] Девисилов В.А., Мягков И.А. Теоретические подходы к расчету гидродинамического вибрационного фильтра. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2012, т. 14, № 1-3, с. 860–865. EDN: QLIQRV
- [5] Бревнов А.А. Совершенствование гидродинамических фильтров за счет закрутки потока в кольцевой области снаружи фильтроэлемента. Дис. ... канд. техн. наук. Сумы, СумГУ, 2009.
- [6] Frolov N.P., Devisilov V.A. Investigation of the pressure drop on the filtration and protective baffles of a hydrodynamic vibration filter using ANSYS CFX. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sc.*, 2021, vol. 815, art. 012008.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/815/1/012008>
- [7] Александров А.А., Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Численное исследование течения жидкости между проницаемыми вращающимися цилиндрическими поверхностями. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 1 (88), с. 32–45. EDN: IOZZOR. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-32-45>
- [8] Белоуков А.А. Фильтр с непрерывной регенерацией. Патент РФ 2651210. Заявл. 26.07.2017, опубл. 18.04.2018.
- [9] Девисилов В.А., Мягков И.А. Гидродинамическое вибрационное фильтрование и конструкции фильтров. *Безопасность жизнедеятельности*, 2004, № 7, с. 37–47.
- [10] Фетисова Е.Г., Голованчиков А.Б., Милова Д.А. Перспективные конструкции фильтрующих центрифуг для псевдопластических жидкостей. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2010, т. 3, № 1, с. 86–88.
EDN: KZGZNP
- [11] Devisilov V., Sharai E. Numerical investigation of two-phase media separation in the hydrodynamic filter. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2019, vol. 492, art. 012004.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/492/1/012004>
- [12] Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Сепарация частиц в кольцевом конфузорном канале с внутренней вращающейся проницаемой перегородкой. *ТВТ*, 2018, т. 56, № 4, с. 597–602. DOI: <https://doi.org/10.31857/S004036440002713-8>

- [13] Девисиллов В.А., Львов В.А., Шарай Е.Ю. Модель процесса разделения суспензий в гидродинамических фильтрах с вращающимся фильтрующим элементом. *Безопасность в техносфере*, 2020, т. 9, № 3, с. 48–56.
DOI: <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-3-48-56>
- [14] Девисиллов В.А., Мягков И.А., Шарай Е.Ю. Исследование гидродинамического вибрационного фильтрования и разработка конструкции фильтра. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2012, т. 14, № 1-3, с. 866–876.
EDN: QLIQSF
- [15] Сугак Е.В., Сугак А.В. Моделирование турбулентных закрученных потоков. *Современные проблемы науки и образования*, 2013, № 1.
URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8312>
- [16] Миньков Л.Л., Дик И.Г. CFD-modeling of a flow in a hydrocyclone with an additional water injector. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2011, т. 3, № 1, с. 63–76. DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2011-3-1-63-76>
- [17] Фролов Н.П., Девисиллов В.А. Компьютерное моделирование гидродинамической очистки жидкости от механических загрязнений. *VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых по проблемам техносферной безопасности*. М., РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2024, с. 164–169.
- [18] Сираев Р.Р. Фильтрация жидкости в пористой среде Форцгеймера с пространственно неоднородными пористостью и проницаемостью. *Вычислительная механика сплошных сред*, 2019, т. 12, № 3, с. 281–292.
DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.3.24>
- [19] Дербунович Г.И., Земская А.С., Репик Е.У. и др. К вопросу о гидравлическом сопротивлении сеток. *Ученые записки ЦАГИ*, 1980, т. 11, № 2, с. 133–136.
EDN: NCQTEP
- [20] Koch K., Revil A., Holliger K. Relating the permeability of quartz sands to their grain size and spectral induced polarization characteristics. *Geophys. J. Int.*, 2012, vol. 190, no. 1, pp. 230–242. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05510.x>
- [21] Bear J. *Dynamics of fluids in porous media*. New York, Elsevier, 1972.
- [22] Девисиллов В.А., Шарай Е.Ю. Сепарация частиц в кольцевом конфузормом канале с внутренней вращающейся проницаемой перегородкой. *ТВТ*, 2018, т. 56, № 4, с. 597–602. DOI: <https://doi.org/10.31857/S004036440002713-8>
- [23] Александров А.А., Девисиллов В.А., Шарай Е.Ю. и др. Влияние геометрических параметров рабочего канала гидродинамического фильтра с защитной перегородкой на структуру течения среды. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2018, № 2 (77), с. 23–38. EDN: YWLZAF.
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-2-23-38>
- [24] Девисиллов В.А., Новиков Ю.М., Большаков В.А. Комбинированные пористые сетчатые металлы и изделия из них. *Безопасность в техносфере*, 2020, т. 9, № 2, с. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-2-43-48>

Александров Анатолий Александрович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Девисилов Владимир Аркадьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Фролов Никита Платонович — аспирант кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Александров А.А., Девисилов В.А., Фролов Н.П. Расчетное и экспериментальное определение ресурса работы гидродинамического фильтра. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 4 (155), с. 43–59. EDN: LFSYLO

COMPUTATION AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HYDRODYNAMIC FILTER SERVICE LIFE

A.A. Aleksandrov

aaa@bmstu.ru

V.A. Devisilov

devisilov@bmstu.ru

N.P. Frolov

login1619@list.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

A problem in using a filter lies in its service life, and the need for periodic regeneration when reaching the maximum permissible pressure drop across the filter partition. To increase the service life, the paper proposes a hydrodynamic filter that combines a number of mechanisms separating the solid phase; in particular, hydrodynamic separation through the centrifugal force, sediment washout, and filtration through a permeable partition. Service life of this type of a filter requires computational determination depending on the operation parameters and characteristics of the medium being purified. Using the hydrodynamic software package, a computational model was developed to determine alteration in the pressure drop across the filter partition over the time as the contaminant sediment accumulated. To assess the computational model adequacy, an increase in the pressure drop was experimentally determined, thereby confirming the computation

Keywords

Filtering, filters, service life, machine simulation, pressure drop

results. An experimental test bench was designed and constructed enabling research across a wide range of the filter operation parameters and characteristics of the medium being purified. The paper demonstrates satisfactory agreement between the experimental results and the computed data. The proposed computer simulation was verified to determine pressure drop across the filter partition making it possible to predict the filter service life, selection of the operation and design parameters, as well as the filtration and regeneration cycles

Received 28.02.2025

Accepted 13.05.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Ilyushchenko A.F., Chernyak I.N., Zhegzdrin D.I., et al. [Regeneration of powder filter elements during filtration of aqueous suspensions of peat hydrohumate]. *Sovremennye problemy osvoeniya novoy tekhniki, tekhnologii, organizatsii tekhnicheskogo servisa v APK. Mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Belagro-2018"* [Current Challenges in Developing New Equipment, Technologies, and Organizing Technical Service in Agro-Industrial Complex. Proc. Int. Sc.-Pract. Conf. Belagro-2018]. Minsk, BGATU Publ., 2018, pp. 168–172 (in Russ.).
- [2] Kamaletdinov R.S., Lazarev A.B. A review of existing methods for combating mechanical impurities. *Inzhenernaya praktika*, 2010, no. 2, pp. 6–13 (in Russ.).
- [3] Mochalin E.V., Mochalina I.G. Efficiency of separating suspended impurities with a rotating filter element. *Vestnik NTU KhPI*, 2011, no. 10, pp. 3–9 (in Russ.).
- [4] Devisilov V.A., Myagkov I.A. Theoretical approaches to calculation of hydrodynamic vibrational filter. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia RAS SamSC], 2012, vol. 14, no. 1-3, pp. 860–865 (in Russ.). EDN: QLIQRV
- [5] Brevnov A.A. Sovershenstvovanie gidrodinamicheskikh filtrov za schet zakrutki potoka v koltsevoy oblasti snaruzhi filtroelementa. Dis. kand. tekhn. nauk [Improving hydrodynamic filters by swirling the flow in an annular region outside the filter element. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Sumy, SumGU, 2009 (in Russ.).
- [6] Frolov N.P., Devisilov V.A. Investigation of the pressure drop on the filtration and protective baffles of a hydrodynamic vibration filter using ANSYS CFX. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sc.*, 2021, vol. 815, art. 012008.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/815/1/012008>
- [7] Aleksandrov A.A., Devisilov V.A., Sharay E.Yu. Numerical investigation of fluid flow between rotating permeable cylindrical surfaces. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 1 (88), pp. 32–45 (in Russ.).
EDN: IOZZOR. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-32-45>
- [8] Belukov A.A. Filtr s nepreryvnoy regeneratsiyey [Filter with continuous regeneration]. Patent RU 2651210. Appl. 26.07.2017, publ. 18.04.2018 (in Russ.).

- [9] Devisilov V.A., Myagkov I.A. Hydrodynamic vibration filtration and filter designs. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety], 2004, no. 7, pp. 37–47 (in Russ.).
- [10] Fetisova E.G., Golovanchikov A.B., Milova D.A. The centrifugal dryer long-range design for pseudoplastic fluids. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2010, vol. 3, no. 1, pp. 86–88 (in Russ.). EDN: KZGZNP
- [11] Devisilov V., Sharai E. Numerical investigation of two-phase media separation in the hydrodynamic filter. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2019, vol. 492, art. 012004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/492/1/012004>
- [12] Devisilov V.A., Sharay E.Yu. Particle separation in an annular converging channel with an inner rotating permeable baffle. *High Temp.*, 2018, vol. 56, no. 4, pp. 576–580. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X18040053>
- [13] Devisilov V.A., Lvov V.A., Sharay E.Yu. Model for the suspensions separation process in hydrodynamic filters with a rotating filter element. *Bezopasnost v tekhnosfere* [Safety in Technosphere], 2020, vol. 9, no. 3, pp. 48–56 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-3-48-56>
- [14] Devisilov V.A., Myagkov I.A., Sharay E.Yu. Investigation of hydrodynamic vibrational filtering and development of construction of a filter. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia RAS SamSC], 2012, vol. 14, no. 1-3, pp. 866–876 (in Russ.). EDN: QLIQSF
- [15] Sugak E.V., Sugak A.V. Simulation of turbulent swirling flows. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2013, no. 1 (in Russ.). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8312>
- [16] Minkov L.L., Dueck J. CFD-modeling of a flow in a hydrocyclone with an additional water injector. *Computer Research and Modeling*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 63–76. DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2011-3-1-63-76>
- [17] Frolov N.P., Devisilov V.A. [Computer modeling of hydrodynamic cleaning of liquids from mechanical contaminants]. *VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh po problemam tekhnosfernoy bezopasnosti* [VI Int. Sc.-Pract. Conf. for Young Scientists on Technospheric Safety Problems]. Moscow, RKhTU im D.I. Mendeleeva Publ., 2024, pp. 164–169 (in Russ.).
- [18] Siraev R.R. Fluid transport in Forchheimer porous medium with spatially varying porosity and permeability. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics], 2019, vol. 12, no. 3, pp. 281–292 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.3.24>
- [19] Derbunovich G.I., Zemskaya A.S., Repik E.U., et al. On issue of hydraulic resistance of grids. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1980, vol. 11, no. 2, pp. 133–136 (in Russ.). EDN: NCQTEP
- [20] Koch K., Revil A., Holliger K. Relating the permeability of quartz sands to their grain size and spectral induced polarization characteristics. *Geophys. J. Int.*, 2012, vol. 190, no. 1, pp. 230–242. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05510.x>
- [21] Bear J. Dynamics of fluids in porous media. New York, Elsevier, 1972.

[22] Devisilov V.A., Sharay E.Yu. Particle separation in an annular converging channel with an inner rotating permeable baffle. *High Temp.*, 2018, vol. 56, no. 4, pp. 576–580.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X18040053>

[23] Aleksandrov A.A., Devisilov V.A., Sharay E.Yu., et al. Effect of geometric parameters of working channel of hydrodynamic filter with protective baffle on medium flow structure. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2018, no. 2 (77), pp. 23–38 (in Russ.). EDN: YWLZAF.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-2-23-38>

[24] Devisilov V.A., Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. Combined porous mesh metals and products made from them. *Bezopasnost v tekhnosfere* [Safety in Technosphere], 2020, vol. 9, no. 2, pp. 43–48 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-2-43-48>

Aleksandrov A.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Ecology and Industrial Safety, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Devisilov V.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Ecology and Industrial Safety, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Frolov N.P. — Post-Graduate Student, Department of Ecology and Industrial Safety, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Aleksandrov A.A., Devisilov V.A., Frolov N.P. Computation and experimental determination of the hydrodynamic filter service life. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 4 (155), pp. 43–59 (in Russ.). EDN: LFSYLO