

На правах рукописи  
УДК 621.671.2

ФАТОВА АЛЬВИНА ВИКТОРОВНА

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА И  
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

**Девисилов Владимир Аркадьевич**

кандидат технических наук, доцент

Официальные  
оппоненты:

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени

К.А. Тимирязева

**Улюкина Елена Анатольевна**

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «Казанский национальный

исследовательский технологический

университет»

**Мухаметзянова Асия Габдулмазитовна**

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный

авиационный технический университет»

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г. в \_\_\_\_\_ на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана» и на сайте университета <http://bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим присылать по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, стр.1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.16

кандидат технических наук, доцент

О.В. Белова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** При решении ряда современных задач в области повышения эффективности, экономичности, безопасности, надежности и ресурса работы гидравлических систем, машин, устройств и гидропневмоагрегатов большое значение имеет промышленная чистота их внутренних объемов, рабочих и технологических сред, особенно в части загрязнения твердыми частицами.

Для обеспечения нормируемых показателей промышленной чистоты обычно используют фильтры тонкой и грубой очистки, имеющие в своем составе различные фильтроэлементы (ФЭ). Тем не менее многие из ФЭ обладают пониженным ресурсом работы и оказываются чувствительными к залповым выбросам твердых частиц загрязнений, что может приводить к возникновению внезапных, непрогнозируемых отказов гидравлических систем в целом.

Для устранения подобных проблем широкое применение нашли гидродинамические фильтры (ГФ), сочетающие предварительную очистку жидкостей в центробежных силовых полях с процессами фильтрования в рамках одного устройства. Среди них необходимо выделить неполнопоточные ГФ с вращающейся перфорированной перегородкой (ПП), которые способны осуществлять в своих конструкциях управляемые процессы предварительной, многоступенчатой очистки жидкостей в рабочих зонах устройства.

Однако методы расчета подобных ГФ базируются на детерминированных, точечных оценках, которые не учитывают многих факторов, включая влияние случайных составляющих протекающих процессов, особенно при расчете процессов предварительной очистки низковязких жидкостей от мелкодисперсных частиц загрязнений размером –  $d_q$ . Все это не исключает ошибок при конструктивном оформлении ГФ и расчета ресурса работы их ФЭ.

При решении этих проблем требуется введение в методику расчетов ГФ комплексных показателей, в частности, непрерывной функции эффективности предварительной, гидромеханической очистки жидкостей –  $T = T(d_q)$ .

Для получения количественных оценок величины функции –  $T = T(d_q)$  необходимо использовать подход, базирующийся на вероятностно-статистических методах расчета с применением большого числа гидродинамических и феноменологических параметров.

В результате исследование особенностей работы ГФ, включая совершенствование методик их расчета на всех стадиях предварительной, многоступенчатой очистки жидкостей, а также методов проведения натурного и вычислительного моделирования, протекающих в них процессов, можно отнести к актуальным и практически значимым задачам современных гидравлических систем, машин, устройств и гидропневмоагрегатов.

**Целью настоящей работы** является совершенствование метода расчета и исследование рабочих характеристик ГФ на основе вероятностно-статистического подхода к изучению и описанию гидромеханических процессов предварительной очистки жидкостей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать вероятностно-статистическую модель гидромеханического, многоступенчатого процесса предварительной очистки жидкостей ГФ с вращающейся ПП и определить непрерывную функцию эффективности предварительной очистки жидкостей от твердых частиц загрязнений –  $T = T(d_u)$ ;

2. Исследовать основные свойства предложенной модели и на их основе установить определяющие параметры и характеристики гидромеханического процесса предварительной очистки жидкостей в ГФ.

3. Провести модельные и экспериментальные исследования определяющих характеристик гидромеханического процесса предварительной очистки жидкостей в ГФ с учетом конструктивных особенностей устройств и их технологических параметров.

4. Проверить адекватность разработанной модели на основе сравнения расчетных, модельных и экспериментальных результатов, включая границы применимости и условия однозначности.

5. Разработать инженерную методику расчета гидромеханического процесса предварительной очистки жидкостей в ГФ с вращающейся ПП.

**Методы исследования.** В работе использовались теоретические, модельные и экспериментальные методы исследования. Теоретические и модельные исследования проведены на кафедре экологии и промышленной безопасности МГТУ им. Н.Э. Баумана. Изучение свойств статистического самоподобия непрерывной функции –  $T = T(d_u)$  в ГФ было проведено на основе экспериментальных исследований моделей гидроциклонов-классификаторов малых размеров, полученных в лабораторных условиях на базе технического факультета Университета Эрланген-Нюрнберг, Германия. Обработка модельных и экспериментальных данных осуществлялась прямыми и косвенными способами анализа с применением методов математической статистики, дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализов.

**Научная новизна:**

1. Впервые создана вероятностно-статистическая модель гидромеханического, многоступенчатого процесса предварительной очистки жидкостей ГФ с вращающейся ПП, позволяющая с учетом влияния стохастических составляющих рассчитать его оптимальные технологические и конструктивные параметры.

2. Установлено, что основными определяющими параметрами формирования структуры потоков в рабочих зонах ГФ с вращающейся ПП являются угловая скорость вращения ПП и ФЭ, а также расход жидкости на входе в устройство.

3. Впервые получены результаты численных расчетов функции эффективности предварительной очистки жидкостей от частиц загрязнений в ГФ с вращающейся ПП при различных технологических и конструктивных параметрах.

4. Обоснована необходимость учета стохастических составляющих при расчете гидромеханического процесса предварительной очистки жидкостей, обладающих малой вязкостью, от частиц загрязнений размером менее 60 мкм в ГФ с вращающейся ПП.

**Практическая значимость и реализация результатов работы:**

1. Созданы методики определения осредненных детерминированных характеристик (тангенциальной, осевой и радиальной составляющих скоростей потока жидкости), а также комплексных показателей, определяющих гидродинамическую обстановку и интенсивность случайных составляющих в рабочих зонах устройств.

2. Определены границы реализации напорного и малонапорного режимов работы ГФ с вращающейся ПП, позволяющие осуществить соответствующий выбор алгоритмов расчета процесса предварительной очистки жидкостей.

3. Разработана инженерная методика расчета эффективности процесса многоступенчатой, предварительной очистки жидкостей в ГФ с вращающейся ПП, учитывающая влияние случайных составляющих и позволяющая существенно сократить время проведения экспериментальных исследований при совершенствовании существующих и разработки новых устройств.

4. Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры экологии и промышленной безопасности МГТУ им. Н.Э. Баумана в курс лекций и семинарских занятий по предмету «Тепломассообмен в биосфере» при обучении магистров кафедры, что подтверждено актом о внедрении.

5. Результаты работы внедрены в ООО «Медиа Инжиниринг», г. Москва при организации контроля по обеспечению промышленной чистоты рабочих и технологических жидкостей при серийном выпуске продукции, что подтверждено актом о внедрении.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Вероятностно-статистическая модель многоступенчатого, управляемого процесса предварительной очистки жидкостей в неполнопоточных ГФ с вращающейся ПП.

2. Методика расчета эффективности процессов очистки жидкостей в ГФ с использованием вероятностно-статистического подхода на основе функций плотности распределений частиц загрязнений по радиусу рабочих областей устройств.

3. Методика исследования интенсивности случайных составляющих протекающих процессов в рабочих зонах ГФ с использованием свойств частичного статистического самоподобия в интегральной форме.

4. Набор обобщенных показателей процесса предварительной очистки жидкостей, характеризующих интенсивность центробежного и классификационного воздействий, а также случайных составляющих протекающих процессов и их количественные оценки.

5. Результаты исследования по определению осредненных характеристик детерминированных составляющих протекающих процессов, на основе

численного моделирования с применением пакета прикладных программ ANSYS CFX.

6. Количественные оценки основных характеристик процесса предварительной очистки жидкостей в неполнопоточных ГФ.

7. Инженерная методика расчета неполнопоточных ГФ с вращающейся ПП, в том числе обеспечивающаяся определение исходных данных для разработки процессов управления, регулирования и контроля.

**Личный вклад автора:**

1. Выполнены обзор и анализ научно-технических публикаций по процессам и устройствам тонкой и грубой очистки жидкостей на основе ГФ.

2. Разработана вероятностно-статистическая модель описания процессов предварительной очистки жидкостей в неполнопоточных ГФ с вращающейся ПП, способная учитывать влияние случайных составляющих протекающих процессов.

3. Проведены теоретические и экспериментальные исследования и найден набор определяющих комплексных параметров процессов предварительной очистки жидкостей в неполнопоточных ГФ с вращающейся ПП.

4. Установлены функциональные взаимосвязи между конструктивными, технологическими и расходными параметрами протекающих процессов, а также определены количественные характеристики для различных режимов работы ГФ.

5. Установлена взаимосвязь между величинами ресурсных характеристик и функций эффективности предварительной очистки жидкостей ГФ с вращающейся ПП для процессов фильтрования с полной закупоркой пор, позволяющая проверить адекватность разработанной модели.

6. Разработана инженерная методика расчета гидромеханического процесса предварительной очистки жидкостей в ГФ с вращающейся ПП, обеспечивающая существенное сокращение объема необходимых модельных и экспериментальных исследований, которая позволяет не только определить исходные данные для расчета ресурсных характеристик ФЭ при различных режимах фильтрования, но и найти необходимые параметры для разработки и реализации процессов управления, регулирования и контроля.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы обсуждались на заседаниях кафедры гидромеханики, гидромашин и гидропневмоавтоматики и кафедры экологии и промышленной безопасности МГТУ им Н.Э. Баумана, а также кафедры инженерной экологии и охраны труда МЭИ. Кроме того, результаты работы докладывались на следующих конференциях: XI научно-техническая конференция «Яковлевские чтения» (Москва, 2016), 22nd International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2016 (Prague, Czech Republic, 2016) и 23rd International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2018 (Prague, Czech Republic, 2018).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, две из которых опубликованы в изданиях, входящих в базу данных SCOPUS (Q2), одна в ведущем научном рецензируемом журнале, рекомендованном ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Текст работы изложен на 185 машинописных страницах, содержит 63 рисунка и 2 таблицы. Список использованных литературы включает 109 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены область исследования, цель и задачи работы, рассмотрены методы исследований, а также новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** представлены результаты анализа возможности практического применения ГФ в составе гидравлических систем, машин, устройств и гидропневмоагрегатов, используемых в различных процессах многих отраслей промышленности.

Рассмотрены основные методы гидромеханической очистки рабочих и технологических жидкостей гидравлических систем и устройств. Отмечена перспективность применения комбинированных методов очистки жидкостей с применением процесса фильтрования. Определена область целевого назначения различных типов ГФ. Показано, что из всего многообразия фильтров грубой и тонкой очистки наименее изученными являются неполнопоточные ГФ с вращающейся ПП, в которых процессы предварительной очистки жидкостей реализуются в центробежном поле. Рассмотрены основные особенности практического применения ГФ. Проведен анализ специфики гидромеханического процесса предварительной очистки жидкостей в ГФ с вращающейся ПП и выявлены его основные характеристики.

На основе анализа составляющих скорости движения жидкости в рабочих зонах ГФ с вращающейся ПП рассмотрено влияние тангенциальной, осевой и радиальной составляющих скорости движения жидкости и проанализированы особенности описания движения частиц твердых загрязнений в рабочих областях устройств.

Рассмотрены принципы оптимизации работы ГФ с вращающейся ПП. Установлено, что при решении многих практических задач целесообразно использование непрерывной функции эффективности гидромеханического процесса предварительной очистки жидкостей  $T = T(d_u)$ .

Выполнен анализ математических методов моделирования гидромеханических процессов предварительной очистки жидкостей в ГФ и установлены особенности динамических, эмпирических и вероятностно-статистических моделей гидромеханических процессов предварительной очистки жидкостей. Показано, что при проведении различного рода исследований наиболее эффективным является комплексный подход, базирующийся на вероятностно-статистических методах расчета, в составе которых для нахождения определяющих технологических параметров и проведения локальных вычислений при определении осредненных, детерминированных составляющих протекающих процессов оправдано

применение гидродинамических и феноменологических подходов с использованием методов численного моделирования, а также теории подобия и размерностей.

**Во второй главе** диссертации приведены результаты теоретических исследований гидромеханического процесса предварительной очистки жидкостей в неполнопоточных ГФ с вращающейся ПП. Разработана вероятностно-статистическая модель указанного процесса, способная более полно учитывать влияние интенсивности его случайных составляющих, представлены расчетная схема этого процесса, а также основные допущения и условия однозначности математической модели.

Определены выражения изменения детерминированных и случайных составляющих скорости движения частиц размером –  $d_q$  по радиусу –  $R$  рабочих зон ГФ с определяющими размерами расчетных радиусов корпуса фильтра –  $R_0$  и ПП –  $R_1$  в зоне тангенциального ввода –  $I$  и защитной зоне фильтра –  $II$  в виде:

$$\frac{dR}{dt} = \begin{cases} \frac{C_q \cdot D_I^2}{R^{2n_I+1}} - \frac{A_{I0}}{R^{l_I}} + \frac{k_{I0} R_0^{n_{I0}}}{R^{n_{I0}}} \xi(t), & R > R_1, \\ \frac{C_q \cdot D_{II}^2}{R^{2n_{II}+1}} - \frac{A_{II0}}{R^{l_{II}}} + \frac{k_{II0} R_1^{n_{II0}}}{R^{n_{II0}}} \xi(t), & R < R_1, \end{cases}, \quad (1)$$

где  $n_I, n_{II}; n_{I0}, n_{II0}; l_I, l_{II}$  – коэффициенты, определяющие гидродинамическую обстановку в рабочих зонах ГФ;  $D_I, D_{II}$  и  $A_{I0}, A_{II0}$  – коэффициенты, характеризующие интенсивность тангенциальных и радиальных составляющих скоростей движения частиц;  $C_q$  – коэффициент, характеризующий свойства разделяемой дисперсной системы,  $k_{I0} \xi(t) R_0^{n_{I0}} / R^{n_{I0}}, k_{II0} \xi(t) R_1^{n_{II0}} / R^{n_{II0}}$  – интенсивность случайных составляющих.

Использование кинетического уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) для рабочих зон ГФ позволяет записать:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_I}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_I} \left[ \left( \frac{c_I}{x_I^{(2n_I - n_{I0} + 1)/(n_{I0} + 1)}} - k_I \cdot x_I^{\frac{(n_{I0} - l_I)}{(n_{I0} + 1)}} \right) f_I(x_I, t) \right] + b_I \frac{\partial^2 f_I(x_I, t)}{\partial x_I^2}, & x_I > x_{I1} \\ \frac{\partial f_{II}}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_{II}} \left[ \left( \frac{c_{II}}{x_{II}^{(2n_{II} - n_{II0} + 1)/(n_{II0} + 1)}} - k_{II} \cdot x_{II}^{\frac{(n_{II0} - l_{II})}{(n_{II0} + 1)}} \right) f_{II}(x_{II}, t) \right] + b_{II} \frac{\partial^2 f_{II}(x_{II}, t)}{\partial x_{II}^2}, & x_{II} < x_{II1} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $f_I(x_I, t)$  и  $f_{II}(x_{II}, t)$  – функция плотности распределения частиц загрязнений по безразмерным координатам –  $x_I = R^{n_{I0}+1} / R_0^{n_{I0}+1}$  и  $x_{II} = R^{n_{II0}+1} / R_1^{n_{II0}+1}$ ;  $c_I, c_{II}; k_I, k_{II}$  и  $b_I, b_{II}$  – коэффициенты, характеризующие интенсивность классификационного воздействия, центробежных сил и случайных возмущений.

Система уравнений (2) устанавливает основные конструктивные, технологические и расходные характеристики, исследуемых ГФ, с учетом физико-химических свойств очищаемой жидкости.

Исследование основных свойств и особенностей практического применения вероятностно - статистической модели гидромеханического



процесса предварительной очистки жидкостей в неполнопоточных ГФ с вращающейся ПП позволило для моментов времени пребывания частиц загрязнений в рабочих областях устройства  $t_{\infty i} \approx 3/K$ , где  $K_i \approx 10^3 \dots 10^8 \text{ c}^{-1}$  получить в общем виде аналитические решения для функций плотности распределений частиц загрязнений по безразмерным координатам ГФ в виде:

$$\begin{cases} f_{I, \infty, n_I, n_{I0}, l_I}(x_I) = C_{I0, n_I, n_{I0}, l_I} \exp\left(\frac{\Theta_I(n_{I0} + 1)}{2(n_{I0} - n_I)} \cdot x_I^{\frac{2(n_{I0} - n_I)}{n_{I0} + 1}} - \frac{m_I(n_{I0} + 1)}{2n_{I0} + 1 - l_I} \cdot x_I^{\frac{2n_{I0} + 1 - l_I}{n_{I0} + 1}}\right) \\ f_{II, \infty, n_{II}, n_{II0}, l_{II}}(x_{II}) = C_{II0, n_{II}, n_{II0}, l_{II}} \exp\left(\frac{\Theta_{II}(n_{II0} + 1)}{2(n_{II0} - n_{II})} \cdot x_{II}^{\frac{2(n_{II0} - n_{II})}{n_{II0} + 1}} - \frac{m_{II}(n_{II0} + 1)}{2n_{II0} + 1 - l_{II}} \cdot x_{II}^{\frac{2n_{II0} + 1 - l_{II}}{n_{II0} + 1}}\right) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $C_{I0, n_I, n_{I0}, l_I}$ ,  $C_{II0, n_{II}, n_{II0}, l_{II}}$  – постоянные коэффициенты, определяемые условиями однозначности;  $\Theta_I = c_I/b_I$ ,  $\Theta_{II} = c_{II}/b_{II}$  и  $m_I = k_I/b_I$ ,  $m_{II} = k_{II}/b_{II}$  – комбинированные определяющие комплексы, характеризующие интенсивность центробежного и классификационного воздействия по отношению к интенсивности случайных составляющих.

Кроме того, представлены результаты исследования частных решений системы уравнений (2), в том числе при  $n_{I0} = n_I$  и  $n_{II0} = n_{II}$ , которые характерны для различных режимов реализации гидродинамического процесса предварительной очистки жидкостей в ГФ.

Представленные теоретические исследования показали, что полученные величины  $f_{I, \infty, n_I, n_{I0}, l_I}(x_I)$  и  $f_{II, \infty, n_{II}, n_{II0}, l_{II}}(x_{II})$  являются многопараметрическим семейством кривых. Это сделало необходимым поиск дополнительных обоснованных допущений, направленных на сокращение количества определяющих параметров.

Для решения этой задачи было использовано свойство статистического самоподобия, заключающееся в том, что изменение шкалы интенсивности случайных составляющих протекающих процессов приводит к тому же самому результату, что и изменение фазовой шкалы.

Это позволило выдвинуть гипотезу о возможности нахождения взаимосвязи между гидродинамической обстановкой в рабочих зонах ГФ и интенсивностью случайных составляющих протекающих в них процессов, которая потребовала экспериментального подтверждения.

На основе разработанной вероятностной методики расчета эффективности процесса многоступенчатой очистки жидкостей в рабочих областях ГФ были определены основные характеристики эффективности гидромеханического процесса предварительной очистки жидкостей в виде зависимостей:

- для зоны тангенциального ввода:

$$\begin{cases} T_{IH} = T_{IH}(d_q) = P(A) \int_1^1 f_{IH, \infty, n_I, n_{I0}, l_I}(x_I, d_q) dx_I + P(B) \int_1^\infty f_{IH, \infty, n_I, n_{I0}, l_I}(x_I, d_q) dx_I \\ D_{IH} = D_{IH}(d_q) = 1 - T_{IH}^{x_{II0}} \\ D_{PP} = D_{PP}(d_q) = D_{IH} \int_0^{x_{I0}} f_{IB, \infty, n_I, n_{I0}, l_I}(x_I, d_q) dx_I / \int_0^1 f_{IB, \infty, n_I, n_{I0}, l_I}(x_I, d_q) dx_I \end{cases}, \quad (4)$$

- для защитной зоны:

$$\begin{cases} T_{II} = D_{II} \int_0^1 f_{II, \infty, n_{II}, n_{II0}, l_{II}}(x_{II}, d_q) dx_{II} / \int_0^1 f_{II, \infty, n_{II}, n_{II0}, l_{II}}(x_{II}, d_q) dx_{II} \\ D_{II} = D_{II}(d_q) = (1 - P(C)) D_{PP} \\ D_F = D_{II} \int_0^{x_F} f_{II, \infty, n_{II}, n_{II0}, l_{II}}(x_{II}, d_q) dx_{II} / \int_0^1 f_{II, \infty, n_{II}, n_{II0}, l_{II}}(x_{II}, d_q) dx_{II} \end{cases}, \quad (5)$$

- для эффективности гидромеханического процесса предварительной очистки жидкостей в целом:

$$T = T(d_q) = 1 - D_F. \quad (6)$$

По результатам теоретических исследований были определены задачи дальнейших экспериментальных и модельных исследований настоящей работы.

В третьей главе работы представлены результаты экспериментальных и модельных исследований случайных и детерминированных составляющих протекающих процессов в рабочих зонах рассматриваемых конструкций ГФ (Рисунок 1). С учетом аналогий между структурами гидродинамических процессов в рабочих зонах ГФ и гидроциклонов, экспериментальные исследования случайных составляющих процессов были проведены на модельном образце гидроциклона малого размера с диаметром цилиндрической части  $d_{ц} = 50$  мм в диапазоне расходов на входе  $Q_0 = 0,5 \cdot 10^{-4} - 1,6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с на дисперсной системе «вода-полевой шпат» с размером  $d_q = 0,4 - 100$  мкм и плотностью частиц  $\rho_q = 2640 - 2670$  кг/м<sup>3</sup> с использованием экспериментального стенда (Рисунок 2). Определение фракционного состава частиц загрязнений производилось анализатором Malvern Mastersizer 2000 в диапазоне размеров частиц 0,05 – 100 мкм.

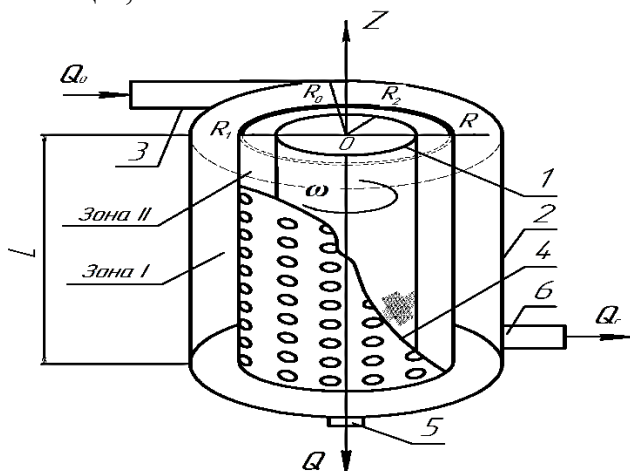


Рисунок 1. Схема ГФ: 1 – ФЭ; 2 – корпус; 4 – перегородка; патрубки: 3 – входной, 5 – выходной, 6 – сбросной; зоны: I – тангенциального ввода; II – защитная

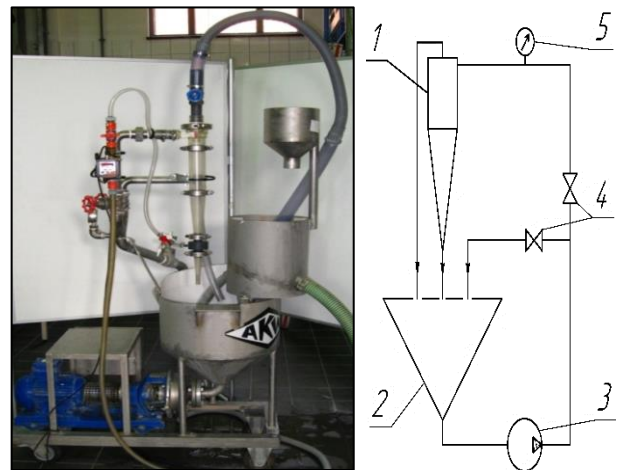


Рисунок 2. Общий вид и гидравлическая схема экспериментального стенда: 1 – гидроциклон; 2 – бак; 3 – насос; 4 – вентили; 5 – манометр

Установленные аналогии между процессами очистки жидкостей в гидроциклонах и ГФ позволили с помощью экспериментальных результатов по определению функции  $T = T(d_q)$  для гидроциклонов подтвердить обоснованность

использования в инженерных расчетах ГФ свойств частичного статистического самоподобия в интегральном виде.

Исходя из теории размерностей и подобия, применительно к рабочим зонам ГФ, была найдена эмпирическая взаимосвязь между величинами  $b_d$  и  $n_i$  с учетом конструктивных параметров, расходных и технологических характеристик устройств, а также свойств очищаемой жидкости в виде:

$$b_d = 1,43 \cdot 10^{-7} \cdot (Q_0 / Q_B) \cdot 2^{-10(|n_i|-1)} (\Delta_i / \Delta^{18})^2 \cdot \exp(d_u / \bar{d}_{ci}) \quad (8)$$

где  $b_d$  – интенсивность случайных составляющих процессов для частиц размером –  $d_u$ ,  $\Delta_i$  и  $\Delta^{18}$  – рабочий и постоянный базовый зазоры,  $Q_0$  и  $Q_B$  – рабочий и постоянный базовый расходы жидкости в рабочих зонах,  $\bar{d}_{ci}$  – средний размер частиц, постоянно присутствующих в зонах циркуляции.

Определение осредненных детерминированных показателей, входящих в предложенную математическую модель осуществлялось на основе пакета прикладных программ ANSYS SFX для низковязких жидкостей с динамической вязкостью  $\mu = 6,5 \cdot 10^{-4} - 1,5 \cdot 10^{-3}$  Па·с и общим расходом  $Q_0 = 3,14 \cdot 10^{-6} - 1,7 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с, расходом сбросного потока  $Q_c = 3,14 \cdot 10^{-7} - 2,5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с; высотой рабочей поверхности элементов ГФ  $L = 150 \cdot 10^{-3} - 160 \cdot 10^{-3}$  м; радиусами корпуса фильтра  $R_0 = 40 \cdot 10^{-3} - 50 \cdot 10^{-3}$  м, перегородки  $R_l = 28,5 \cdot 10^{-3} - 34,5 \cdot 10^{-3}$  м, ФЭ  $R_2 = 15 \cdot 10^{-3} - 25 \cdot 10^{-3}$  м; диаметрами: входного  $d_{вх} = 10 \cdot 10^{-3} - 28 \cdot 10^{-3}$  м, выходного  $d_{с} = 10 \cdot 10^{-3} - 20 \cdot 10^{-3}$  м и сбросного  $d_c = 10 \cdot 10^{-3} - 28 \cdot 10^{-3}$  м патрубков; размер каналов перегородки  $d_{кан} = 3 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3}$  м; размер пор ФЭ  $d_n = 5 \cdot 10^{-6} - 100 \cdot 10^{-6}$  м; толщина перегородки  $\delta_l = 3 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}$  м; угловой скоростью вращения перегородки и ФЭ  $\omega = 10,5 - 335$  рад/с.

В результате исследований структуры потоков жидкости было установлено, что в отличие от гидроциклонов в рабочих зонах ГФ наряду с крупными единичными циркуляционными контурами постоянно присутствует несколько циркуляционных контуров и волнообразных течений меньших масштабов (Рисунок 3), что указывает на обоснованность применения предложенной стохастической модели.

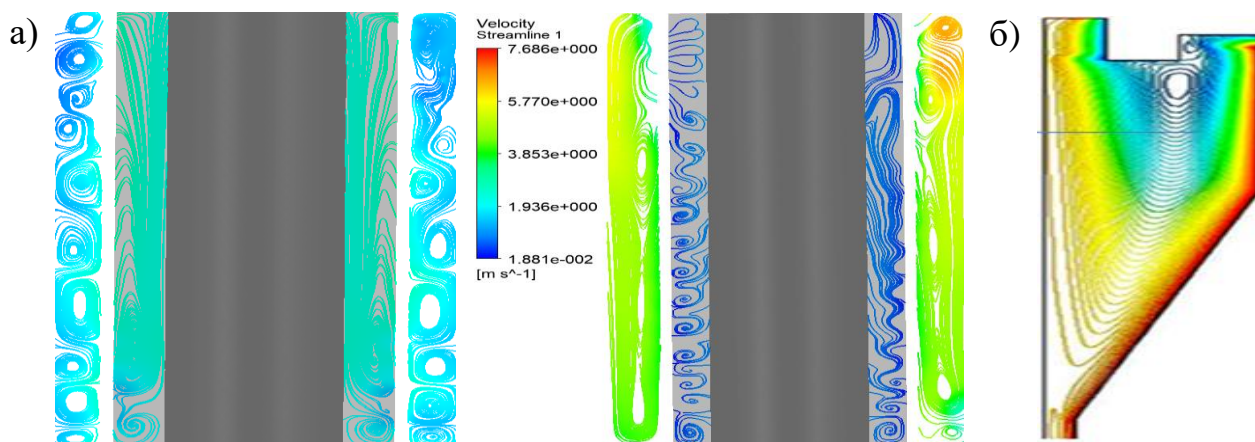


Рисунок 3. Структуры потоков жидкости: а) ГФ; б) гидроциклон

Исследования относительной осредненной тангенциальной составляющей скорости потока жидкости –  $w_0/w_{ex}$ , где  $w_{ex}$  – средняя скорость жидкости на входе в ГФ, позволили выявить в рабочих зонах постоянство этой составляющей по их высоте, что подтвердило не только стабилизирующее воздействие вращающейся перегородки, но и обоснованность применения цилиндрической формы стенки устройств (Рисунок 4).

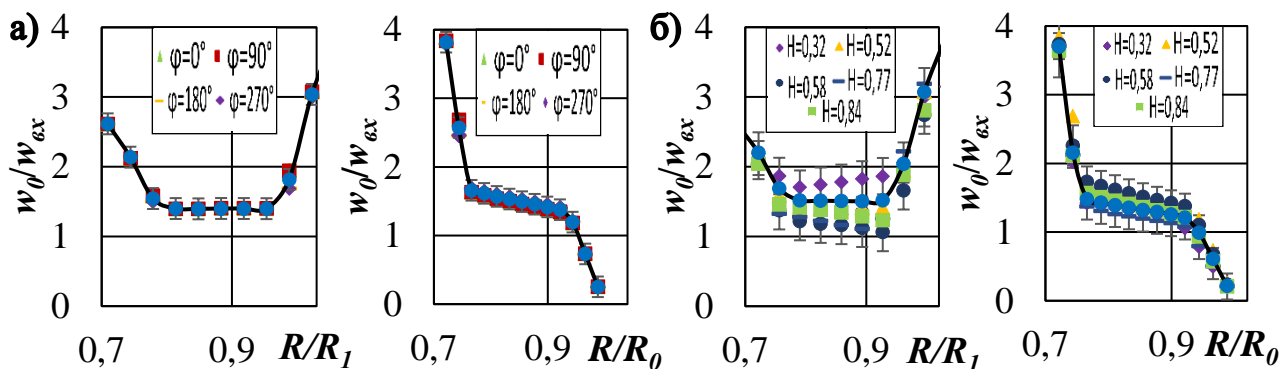


Рисунок 4. Изменение относительной тангенциальной составляющей скорости потока жидкости  $w_0/w_{ex}$  в рабочих зонах ГФ:

а) по азимуту  $\varphi$ : б) по относительной высоте  $H=h/L$

Полученные результаты позволили выявить два основных режима работы ГФ – малонапорный и напорный, в первом из которых одним из определяющих параметров является скорость вращения ПП, а во втором – скорость потока жидкости на входе в ГФ (Рисунок 5). Граничная скорость на входе в устройство была определена в виде:

$$w_{ex}^{cp} = K_{\Gamma} \cdot w_{I_{22}}, \quad (4)$$

где  $K_{\Gamma} = (0,8166R_0 - 1,2041\Delta_I) / (0,6896R_0 + 2,2828d_{ex})$ ,  $\Delta_I$  – величина зазора зоны тангенциального ввода,  $w_{I_{22}}$  – линейная скорость вращения ПП.

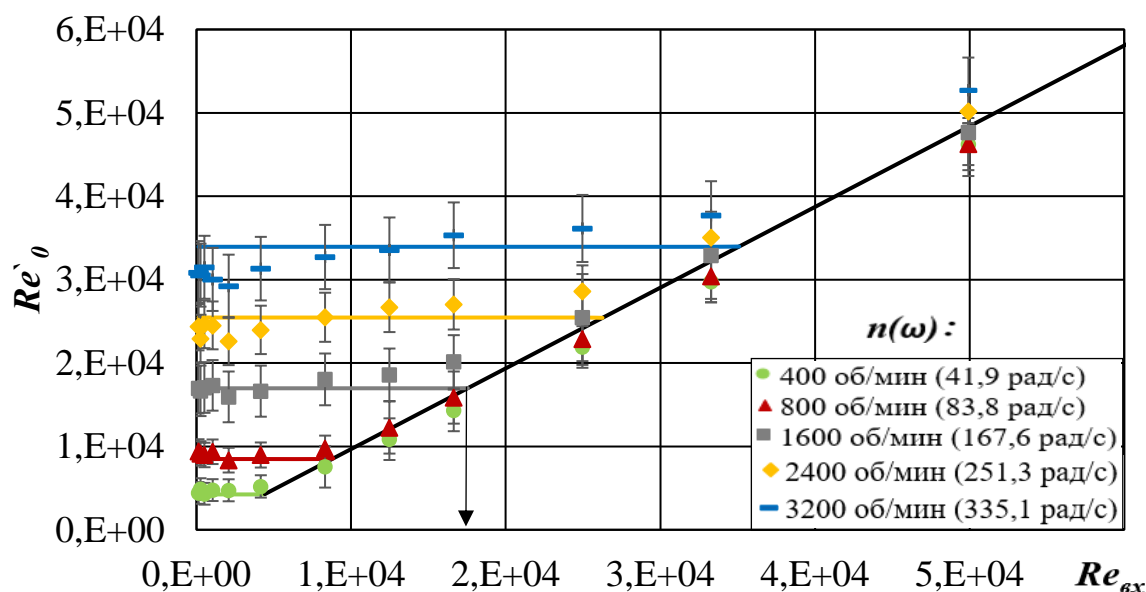


Рисунок 5. Взаимосвязь между величинами чисел Рейнольдса на входе ГФ –  $Re_{ex} = w_{ex} \Delta_I \rho_c / \mu$  и на границе пограничного слоя –  $Re'_0 = w'_0 \Delta_I \rho_c / \mu$  в зоне тангенциального ввода (1 – малонапорный режим, 2 – напорный режим)

Проведенные исследования позволили выявить не только преимущество входных конструкций ГФ по сравнению с гидроциклонами (Рисунок 6), но и предоставили возможность на основе коэффициента потери скорости потока жидкости –  $k'_{ex}$  оптимизировать ее конструкции (Рисунок 7).

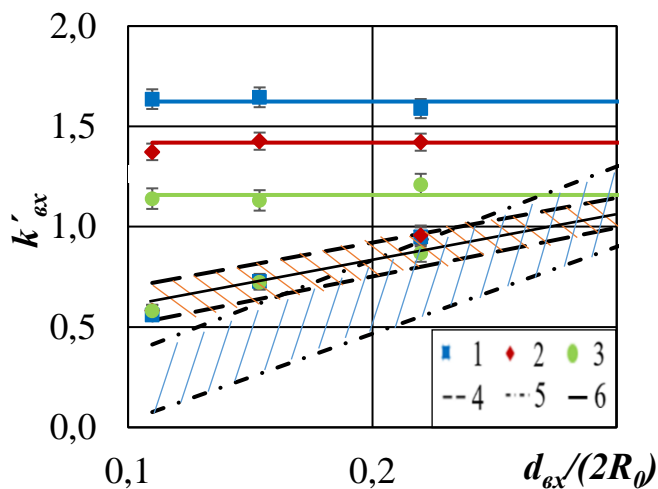


Рисунок 6. Коэффициент изменения скорости потока жидкости на входе в ГФ при малонапорном режиме: 1 –  $\Delta_I/(2R_0) = 0,12$ , 2 –  $\Delta_I/(2R_0) = 0,14$ , 3 –  $\Delta_I/(2R_0) = 0,19$ ; 4 – напорном режиме; 5 – гидроциклон; 6 – уравнение  $k'_{ex}$

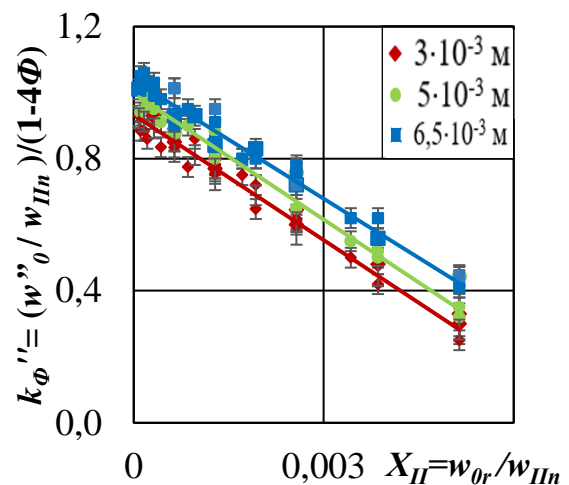


Рисунок 7. Взаимосвязь между показателями  $k''_{\phi}$  и  $X_{II} = w_{0r}/w_{IIin}$

Установлено, что в зоне тангенциального ввода для малонапорного режима показатель степени  $n_I$  практически не зависит от угловой скорости вращения ПП. Для напорного режима с помощью введения модифицированного показателя степени  $n_I^*$  определена взаимосвязь между этим показателем и комплексной величиной  $X_I$ , характеризующей относительное изменение скорости потоков жидкости с учетом конструктивных параметров (Рисунок 8). В защитной зоне ГФ было введено понятие критического зазора –  $\Delta_{IIkr}$ . (Рисунок 9).

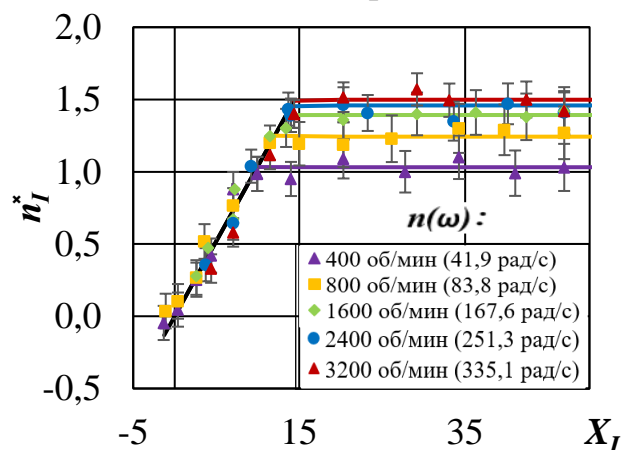


Рисунок 8. Взаимосвязь между модифицированным показателем  $n_I^*$  и комплексной величиной  $X_I$

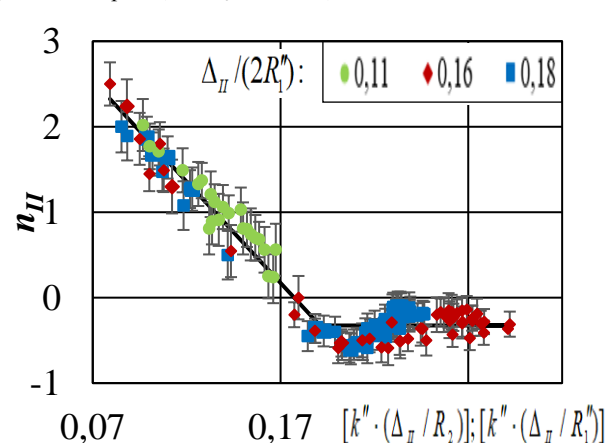


Рисунок 9. Взаимосвязь между коэффициентом  $n_{II}$  и показателями  $X_{IIin} = [k'' \cdot (\Delta_{II}/R_2)]; [k'' \cdot (\Delta_{II}/R_1'')]$

Это позволило установить, что при размерах зазора меньше этой величины, определяющее влияние на гидродинамическую обстановку оказывает вращение поверхности ФЭ, а при больших – поверхность ПП.

Исследования осредненной осевой составляющей показали наличие в рабочих зонах ГФ «цилиндрических оболочек нулевой осевой скорости», что позволило определить границы областей нисходящих и восходящих потоков жидкости (Рисунок 10). Это позволило сделать вывод, что в подобных конструкциях ГФ реализуется четырехступенчатая система предварительной очистки жидкостей, и определить граничные значения безразмерных радиусов всех ступеней очистки, а также их расходные характеристики.

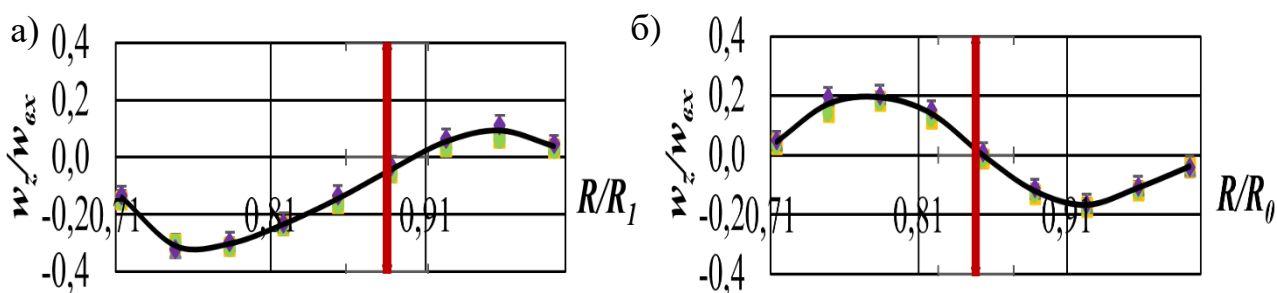


Рисунок 10. Изменение осредненной осевой составляющей  $w_z/w_{ex}$  по безразмерным радиусам  $R/R_1$  и  $R/R_0$  в зонах:

а) защитной; б) тангенциального ввода (| – граница областей)

Результаты исследования осредненной радиальной составляющей скорости потока жидкости позволили определить количественные оценки необходимых эмпирических коэффициентов предложенной модели (Рисунок 11).

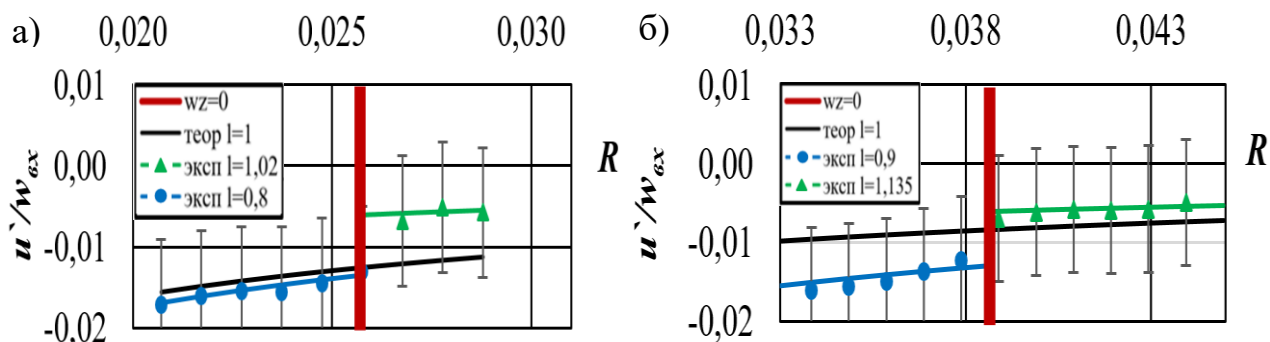


Рисунок 11. Изменение осредненной радиальной составляющей скорости потока жидкости  $u'/w_{ex}$  по радиусу рабочих зон: а) защитной; б) тангенциального ввода (| – граница областей)

Следует особо подчеркнуть, что этой составляющей присущи большие флуктуации, зачастую превышающие ее осредненные значения, а коэффициент вариации этой величины может существенно превышать единицу. Указанные обстоятельства подтверждают обоснованность применения стохастических методов расчета для процессов очистки жидкостей в ГФ от мелкодисперсных загрязнений.



В результате модельных исследований удалось обобщить полученные результаты и однозначно определить величины необходимых осредненных детерминированных параметров, используемых в предложенной математической модели, а также разработать методики их более детального моделирования и исследования.

Кроме того, модельные исследования позволили получить функции плотности распределения частиц загрязнений  $i$ -ых фракций по безразмерным координатам рабочих зон ГФ с учетом граничных условий (Рисунок 12).

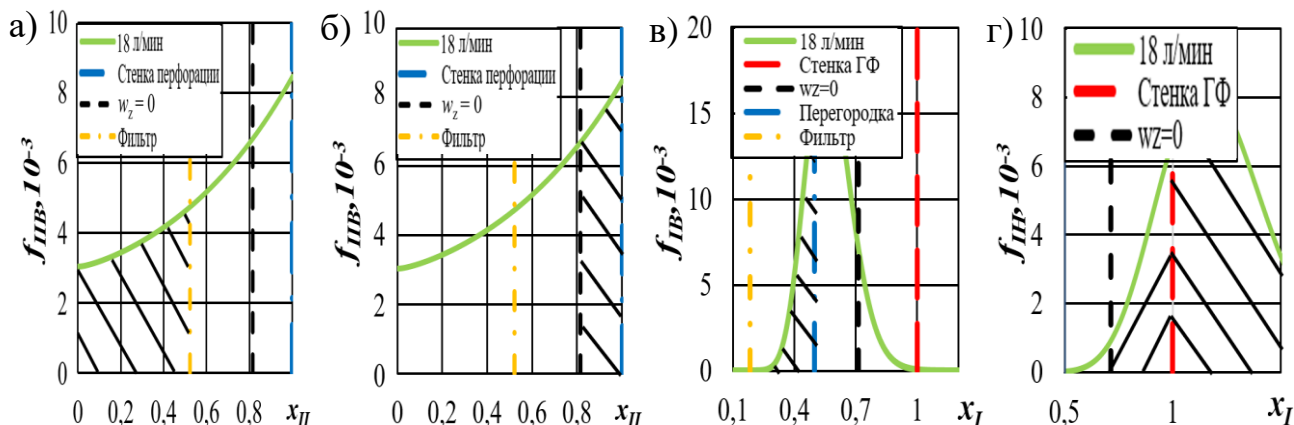


Рисунок 12. Функции плотности распределения частиц загрязнений  $i$ -ых фракций в защитной зоне: а) степень очистки  $IV$ , б) степень очистки  $III$ ; в зоне тангенциального ввода: в) степень очистки  $II$ , г) степень очистки  $I$

В результате была разработана методика определения количественных значений искомой функции эффективности процесса предварительной очистки жидкостей  $T = T(d_u)$  в ГФ.

На Рисунке 13 представлены результаты определения  $T = T(d_u)$  для ГФ и гидроциклона с тем же диаметром цилиндрической части, что и ГФ, а также детерминированные, точечные оценки величин  $\delta_{гр}$  и  $\delta_{50}$  – размеров частиц, улавливаемых в тех же условиях на 100% и 50%, соответственно, которые получены в результате расчета без учета влияния случайных составляющих протекающих процессов.

В исследуемом диапазоне расходов жидкости, эффективность очистки ГФ с вращающейся ПП оказывается выше, чем в гидроциклонах практически для всех анализируемых размеров частиц загрязнений.

Установлено, что для частиц загрязнений размером более 60 мкм значения функции –  $T = T(d_u)$  для ГФ практически не отличаются от детерминированных, точечных оценок существующих методик расчета величины  $\delta_{гр}$  и приближаются к 100%. Для частиц размером менее 60 мкм использование  $\delta_{гр}$  и  $\delta_{50}$  в расчетах приводит как к заниженным (эффективность улавливания частиц загрязнений близка к нулю), так и завышенным результатам (эффективность улавливания частиц загрязнений близка к 100%) по сравнению с непрерывной функцией эффективности очистки жидкостей –  $T = T(d_u)$ , учитывающей влияние случайных составляющих.

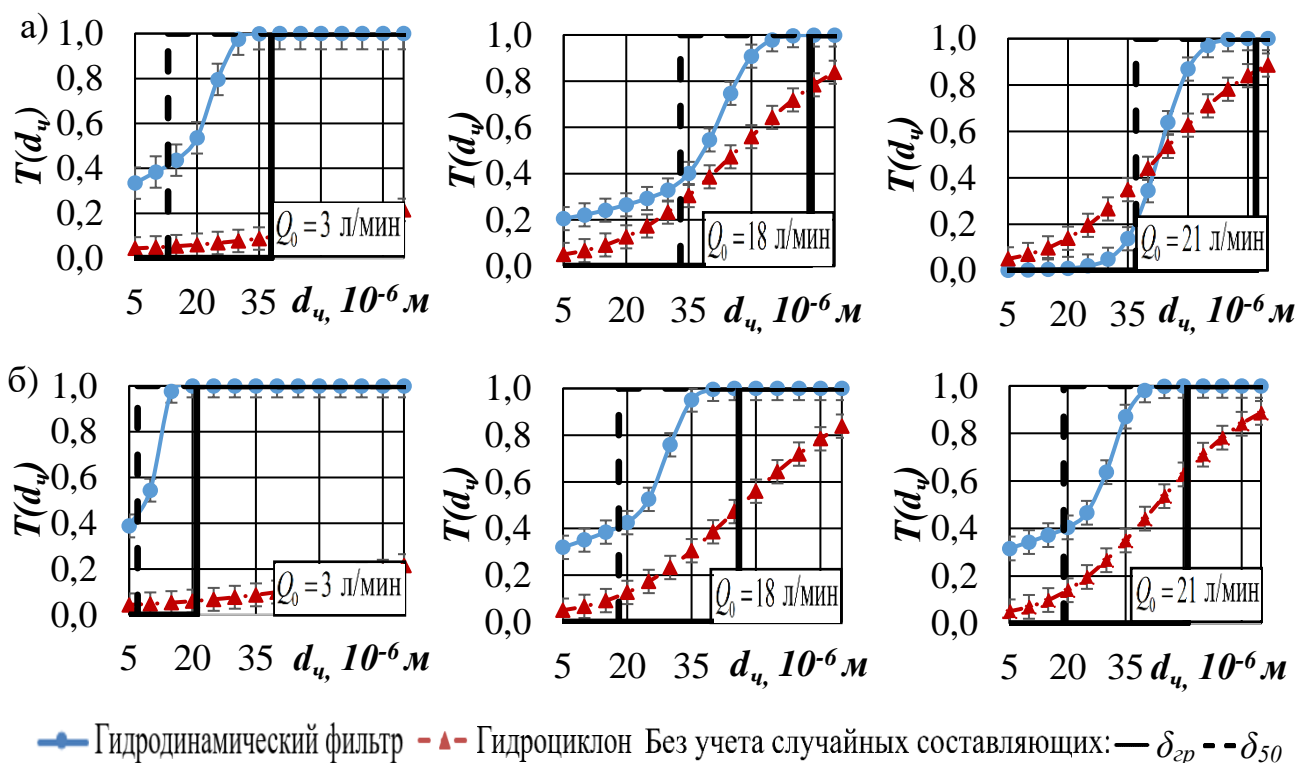


Рисунок 13. Результаты определения непрерывных функций комплексной эффективности предварительной очистки жидкостей  $T = T(d_u)$  в рабочих зонах устройства при: а) –  $\omega = 83,78$  рад/с; б) –  $\omega = 168$  рад/с

Представленные результаты позволяют констатировать, что математические модели, не учитывающие наличие стохастических составляющих, не способны в полном объеме описать процессы предварительной, гидромеханической очистки низковязких жидкостей от частиц загрязнений размером менее 60 мкм в ГФ.

Проверка адекватности предложенной модели производилась косвенными методами путем сравнения с опубликованными экспериментальными данными, полученными другими исследователями (Рисунки 14 и 15).

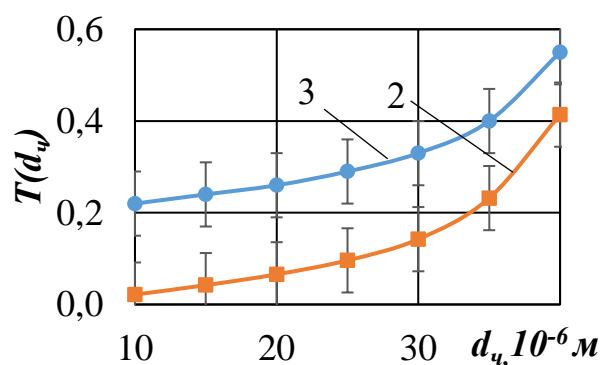


Рисунок 14. Функции эффективности очистки жидкостей  $T_2(d_u)$  и  $T_3(d_u)$  для ПП: 2 – без вращения; 3 – с вращением

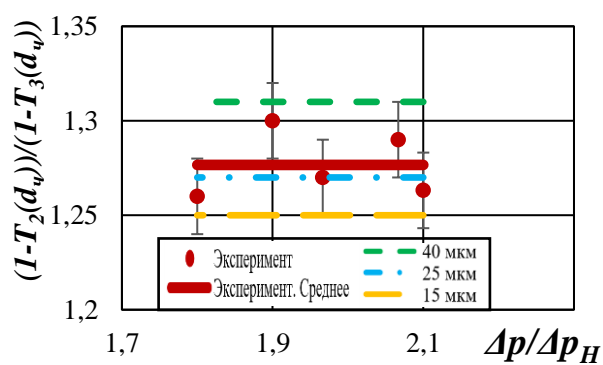


Рисунок 15. Взаимосвязь величин  $(1 - T_2(d_u)) / (1 - T_3(d_u))$  и  $\Delta p / \Delta p_H$



Проверка проводилась на основе экспериментальных данных по ресурсу работы ГФ с ФЭ из сетки С685 в режиме фильтрования с полной закупоркой его пор полидисперсным материалом с размером частиц 10-40 мкм.

После нахождения взаимосвязи между величинами экспериментальных ресурсных характеристик и полученной с помощью разработанной математической модели непрерывных функций эффективности предварительной очистки жидкостей для различных размеров частиц в ГФ были определены соответствующие величины  $(1 - T_2(d_q)) / (1 - T_3(d_q))$  и  $\Delta p / \Delta p_H$ , где  $\Delta p$  – перепад давления на ФЭ,  $\Delta p_H$  – начальный перепад давления на ФЭ (Рисунок 15).

Отсутствие противоречий между результатами других авторов и расчетными данными, полученными с помощью предложенной модели, позволило считать созданную математическую модель и разработанные методики адекватными и экспериментально обоснованными.

**В четвертой главе** с целью практической реализации полученных результатов представлены методики расчета определяющих параметров и эффективности процесса гидромеханической очистки жидкостей в рабочих зонах неполнопоточных ГФ с вращающейся ПП. Приведены блок-схемы методик расчета и пример их практической реализации.

Показано, что на основании исходных данных предложенной модели можно произвести не только расчет процесса предварительной очистки жидкостей в ГФ и осуществить его моделирование с целью оптимизации полученных результатов, но и использования их для расчета ресурсных характеристик ФЭ в различных режимах фильтрования, а также найти необходимые параметры для разработки и реализации процессов управления, регулирования и контроля работы ГФ в составе гидравлических систем.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработанная вероятностно-статистическая модель способна адекватно описать реализацию гидромеханического, многоступенчатого процесса предварительной очистки жидкостей в ГФ с вращающейся ПП с учетом влияния случайных составляющих протекающих процессов.

2. Созданная модель позволяет получить непрерывную функцию эффективности предварительной очистки жидкостей от твердых частиц загрязнений –  $T = T(d_q)$  в ГФ с вращающейся ПП.

3. Для ГФ с вращающейся ПП найденный критерий условий реализации напорного и малонапорного режимов предварительной очистки жидкостей обеспечивает синхронизацию скорости вращения ПП и расходных характеристик, а также позволяет осуществить выбор соответствующих алгоритмов расчета.

4. Количественные оценки найденной взаимосвязи между гидродинамической обстановкой и интенсивностью случайных составляющих протекающих процессов в рабочих зонах ГФ с вращающейся ПП, учитывающие

конструктивные и технологические особенности их реализации, обеспечивают сокращение времени моделирования процесса предварительной очистки жидкостей более, чем на порядок.

5. Созданные методики определения осредненных детерминированных характеристик (тангенциальной, осевой и радиальной составляющих скоростей потока жидкости), а также комплексных показателей, определяющих гидродинамическую обстановку и интенсивность случайных составляющих в рабочих зонах ГФ с вращающейся ПП, позволяют более, чем на 50% сократить объем необходимых экспериментальных исследований.

6. Разработанная инженерная методика расчета эффективности процесса многоступенчатой, предварительной очистки жидкостей в ГФ с вращающейся ПП, учитывающая влияние случайных составляющих протекающих процессов, позволяет для низковязких жидкостей с мелкодисперсными загрязнениями повысить точность результатов расчета ресурсных характеристик применяемых ФЭ не менее, чем на 20 %.

### **Публикации по теме диссертации:**

1. Девисилов В.А., Львов В.А., Фатова А.В. Особенности движения твердых частиц в рабочих зонах неполнопоточных гидродинамических фильтров с вращающейся перфорированной перегородкой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2022. № 2 (141). С. 112-127. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-112-127> (1 п.л. / 0,8 п.л.).

2. Krokhina A.V., Lvov V.A., Fatova A.V. Practical Application of the Probabilistic-Statistical Model of the Suspension Separation in Hydrocyclones // Chemical Engineering and Technology. 2019. Vol. 42. I. 4. P. 774–779. DOI: 10.1002/ceat.201800599 (0,75 п.л. / 0,6 п.л.).

3. Krokhina A.V., Lvov V.A., Fatova A.V. Asymptotic Properties of a Probabilistic-Statistical Model of Particle Classification Process in Hydrocyclones // Chemical Engineering and Technology. 2018. Vol. 42. I. 1. P. 209–214. DOI: 10.1002/ceat.201800370 (0,75 п.л. / 0,6 п.л.).

4. The study of properties of probabilistic-statistical model of the particle classification process in hydrocyclones classifiers of small sizes / Krokhina, A.V., Lvov, V.A., Fatova, A.V. // In. proc. 23th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA. Prague, Czech Republic. 2018. P.228-229 (0,13 п.л. / 0,1 п.л.).

5. Probabilistic method of calculation of processing of water in the spiactor/ Fatova A.V. [et al.] // In. proc. 22nd International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2016. Prague, Czech Republic. 2016. P.349 (0,06 п.л. / 0,03 п.л.).

6. Вероятностно-статистический метод расчета вихревых реакторов / Фатова А.В. [и др.] // В сборнике докладов XI научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковлева. Москва. 2016. Стр. 51-55 (0,31 п.л. / 0,2 п.л.).