

На правах рукописи

**ШАРАЙ ЕЛЕНА ЮРЬЕВНА**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ И РАЗРАБОТКА  
МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ**

Специальность 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, доцент кафедры экологии и промышленной безопасности МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Официальные оппоненты:**  
**Зуйков Андрей Львович**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

**Целищев Владимир Александрович**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной гидромеханики ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)

Защита диссертации состоится «\_\_\_» 2022 г. в \_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры Э-4.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.14.16  
кандидат технических наук, доцент



О.В. Белова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Во многих отраслях промышленности существует проблема очистки высоковязких и неньютоновских жидкостей от находящихся в них твердых примесей. Особую актуальность эта проблема приобретает в настоящее время, когда для каждого предприятия имеет большое значение промышленная чистота рабочих и технологических жидкостей, влияющая на экономичность и ресурс работы применяемого оборудования, качество выпускаемой продукции, безаварийность и надежность технологических линий. Кроме того, актуальные проблемы во вторичном использовании природных ресурсов, требуют развития технологий очистки рабочих жидкостей от твердых частиц.

Фильтрующие устройства являются составной частью многих гидравлических машин, аппаратов и гидропневмоагрегатов и предназначены для очистки рабочих жидкостей от механических частиц, загрязнение которых может происходить во время изготовления и хранения жидкостей, заправки в гидросистему и эксплуатации.

Перспективным направлением в области разработки аппаратов очистки высоковязких и псевдопластичных жидкостей от механических примесей может стать сочетание фильтрования с силовым воздействием на поток, создающее дополнительное поле массовых сил, позволяющее улучшить условия очистки и восстановить пропускную способность фильтра саморегенерацией фильтровальной перегородки (ФП) от накопленного осадка. К таким устройствам относятся гидродинамические фильтры (ГФ), реализующие принцип гидродинамического фильтрования, широкое внедрение которых сдерживается рядом нерешенных вопросов.

К ним в первую очередь следует отнести отсутствие однозначных экспериментальных данных о характеристиках ГФ с сочетанием вращения фильтровальной перегородки и тангенциальной закруткой потока, поэтому исследование структуры закрученного потока должно быть неотъемлемой частью разработки ГФ. Кроме того, для решения современных практических задач требуется определение эффективности разделения частиц в ГФ для высоковязких и неньютоновских сред. Незавершенность теории ГФ связана с отсутствием универсальных методик их расчета, выбора и конструктивного оформления аппаратов.

Таким образом, совершенствование, определение характеристик и разработка метода расчета ГФ для очистки от твердых примесей высоковязких и псевдопластичных жидкостей можно отнести к актуальным и практически значимым задачам современных гидравлических машин, устройств, аппаратов и гидропневмоагрегатов.

**Цель исследования.** Целью исследования является совершенствование гидродинамических фильтров для очистки от твердых примесей высоковязких и неньютоновских жидкостей и разработка методики их

расчета на основании детерминированного метода описания процесса эволюции дисперсных систем «жидкость – твердое тело».

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка математической модели на основе детерминированного подхода, описывающей гидродинамические и сепарационные процессы в гидродинамическом фильтре с вращающейся фильтровальной перегородкой и тангенциальным вводом для высоковязких и псевдопластичных жидкостей.

2. Проведение модельных расчетов основных гидродинамических характеристик и эффективности сепарации частиц за счет действия центробежного поля на основе созданной математической модели, с использованием современных программных комплексов вычислительной гидродинамики, в частности программного продукта ANSYS CFX.

3. Установление определяющих параметров процесса сепарации частиц за счет действия центробежного поля в гидродинамическом фильтре с вращающейся фильтровальной перегородкой и тангенциальным входом.

4. Проведение экспериментальных исследований с целью верификации разработанной математической модели.

5. Анализ полученных теоретических, расчетных, экспериментальных данных и данных других авторов с целью обоснования достоверности результатов исследования и разработки практических рекомендаций.

6. Разработка инженерной методики расчета гидродинамических фильтров в системах очистки технологических жидкостей, обладающих высоковязкими и неиньютоновскими свойствами.

**Основные методы исследования.** В работе использовались теоретические, модельные и экспериментальные методы исследования, в том числе:

1. Математическое моделирование гидродинамических и сепарационных процессов в гидродинамическом фильтре.

2. Экспериментальная верификация результатов численного моделирования.

3. Обработка экспериментальных данных прямым и косвенным способом анализа с применением методов математической статистики, корреляционного и регрессивного анализа.

**Научная новизна.** Научная новизна заключается в следующем:

1. Впервые создана математическая модель движения псевдопластичной жидкости в гидродинамическом фильтре с сужающимся коническим корпусом, вращающейся фильтровальной перегородкой и тангенциальным входом, позволяющая рассчитать оптимальные режимные и конструктивные параметры процесса очистки.

2. Впервые получены результаты численных расчетов эффективности сепарации частиц под действием центробежного поля в ГФ при различных

режимных параметрах, реологических свойствах дисперсионной среды и дисперсном составе загрязнений.

3. Установлено, что основным определяющим параметром формирования структуры потоков в кольцевом сужающемся канале между коническим корпусом гидродинамического фильтра и его вращающейся фильтровальной перегородкой является тангенциальная скорость во входной зоне канала.

4. Установлено, что определяющими параметрами процесса сепарации частиц за счет действия центробежного поля в гидродинамическом фильтре с вращающейся фильтровальной перегородкой и тангенциальным вводом очищаемой жидкости являются режимные параметры, реологические свойства дисперсионной среды и свойства дисперсной фазы.

**Практическая значимость.** Практическая значимость заключается в следующем:

1. Установлено, что сочетание гидродинамического смыва, вращения фильтровальной перегородки и тангенциального ввода в гидродинамическом фильтре существенно увеличивает эффективность сепарации частиц центробежным полем и снижает энергозатраты за счет уменьшения эффективной вязкости дисперсионной среды по сравнению с неподвижной фильтровальной перегородкой.

2. Разработан гидродинамический фильтр и создан экспериментальный стенд, позволяющий проводить натурные исследования гидродинамических и сепарационных характеристик в гидродинамическом фильтре в диапазоне расходов от  $1,6 \cdot 10^{-5}$  до  $3,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с (от 1 до 20 л/мин), при избыточном давлении на входе в фильтр до 1,0 МПа, при вязкости жидкости от  $1,0 \cdot 10^{-6}$  до  $3,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с (от 1 до 350 сСт), частоте вращения фильтровальной перегородки от 0 до 83 Гц (от 0 до 5000 об/мин), с контролем гранулометрического состава частиц дисперсной фазы в диапазоне от 5 до 300 мкм.

3. Даны количественные оценки влияния режимных и реологических параметров на гидродинамику и сепарационную способность в гидродинамическом фильтре и рекомендации по подбору режимных параметров гидродинамического фильтра в зависимости от характеристик дисперсионной среды и дисперсной фазы.

4. Разработана методика расчета гидродинамического фильтра с вращающейся фильтровальной перегородкой и тангенциальным вводом, позволяющая профилировать проточные части фильтра, определять гидродинамику потоков и сепарационные характеристики, что приводит к существенной экономии времени исследований и экспериментальных испытаний новых фильтров.

**Достоверность** полученных результатов определяется сходимостью итерационного алгоритма при численном моделировании, проведением

испытаний опытного образца, применением апробированных методик и методов измерения, сертифицированного современного измерительного оборудования, проверкой повторяемости экспериментальных данных, сходимостью результатов исследований с данными других авторов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель течения двухфазного потока с учетом псевдопластиичности жидкости в гидродинамическом фильтре с сужающимся коническим корпусом, вращающейся фильтровальной перегородкой и тангенциальным вводом очищаемой жидкости.

2. Результаты модельных исследований структуры потоков, определяющие параметры устойчивого течения, влияние режимных параметров на эффективную вязкость псевдопластиичной жидкости в гидродинамическом фильтре с сужающимся коническим корпусом, вращающейся фильтровальной перегородкой и тангенциальным вводом очищаемой жидкости.

3. Результаты модельных и экспериментальных исследований по определению сепарационных характеристик гидродинамического фильтра при течении высоковязких и псевдопластиичных жидкостей.

4. Методика инженерного расчета гидродинамического фильтра с вращающейся фильтровальной перегородкой и тангенциальным вводом.

5. Полезные модели гидродинамического фильтра и установки для очистки жидкостей от механических загрязнений.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

1. XIX школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Орехово-Зуево (Моск. обл.), 2013);

2. 5-я международная научно-техническая конференция «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства» (Омск, 2015);

3. Научно-практическая конференция с международным участием «Нефтегазовый комплекс: проблемы и инновации» (Самара, 2016);

4. 9th International Conference on Multiphase Flow «ICMF-2016» (Флоренция (Италия), 2016);

5. Научный симпозиум «Проблемы и инновационные решения в области инженерного обеспечения экологической и промышленной безопасности урбанизированных территорий». Самара, Тольятти, 2017;

6. 10th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection. Mechanical Engineering – SEEP 2017 (Блед (Словения), 2017);

7. Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (Севастополь, 2019);

8. International conference and exhibition for filtration and separation technology «Filtech» (Кельн (Германия), 2019);

9. 3rd International Scientific Conference «Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources. SEWAN-2019» (Иркутск, 2019).

**Публикации.** Основные научные результаты по теме диссертационной работы изложены в 20 научных работах, опубликованных в журналах и сборниках научных трудов, в том числе 10 – в статьях, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК, 6 – в изданиях, индексируемых Scopus, 3 – в изданиях, индексируемых Web of Science. Общий объем – 10,1 п.л./8,2 п.л. Получено 2 патента Российской Федерации на полезную модель. Результаты исследования опубликованы в 6 научно-технических отчетах на правах рукописи.

**Личный вклад соискателя.** Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности.

**Внедрение результатов исследования.** Результаты работы используются в учебном процессе кафедры экология и промышленная безопасность при подготовке магистров и аспирантов МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеется акт внедрения.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста и общих выводов, списка литературы, четырех приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 153 страницы. Работа содержит 62 рисунка, 4 таблицы и библиографический список из 181 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена область исследований, сформулированы цель и задачи исследования.

**В Главе 1** приводится обзор опубликованных работ по теме диссертации и анализируется современное состояние предметной области исследования, определяются проблемные вопросы.

Представлены результаты анализа современных методов очистки высоковязких и псевдопластичных жидкостей от твердых примесей, показано преимущество сочетания гидродинамического фильтрования с дополнительными силовыми механизмами по сравнению с очисткой в гидроциклонах и фильтрующих центрифугах, традиционным и гидродинамическим фильтрованием.

Проведен анализ существующих конструктивных схем гидродинамических фильтров с точки зрения обеспечения гарантированной тонкости очистки, затрат на изготовление и эксплуатацию, способности к саморегенерации и созданию дополнительных скоростей сдвига для получения возможности снижения эффективной вязкости псевдопластичной жидкости в рабочей зоне разделения. Предложена перспективная конструктивная схема неполнопоточного ГФ с цилиндрической врачающейся ФП и коническим корпусом, очищаемый поток в котором

движется вдоль образующей цилиндра, и дополнительной закруткой потока тангенциальным вводом очищаемой жидкости в аппарат. Достоинством предложенной организации течения является то, что при гарантированном соблюдении требуемой в технологическом процессе тонкости очистки, которая обеспечивается размером ячейки фильтровального материала, фильтр обладает самоочищающейся способностью, увеличивается ресурс работы фильтра за счет отделения части частиц центробежным механизмом, уменьшается эффективная вязкость псевдопластичной жидкости в рабочем канале фильтра.

Проанализированы существующие в настоящее время подходы к описанию гидродинамического фильтрования через цилиндрическую вращающуюся ФП, в которых отмечается наличие критической частоты вращения, определяющей границу появления неустойчивого течения по типу течения Куэтта-Тейлора с образованием вихрей Тейлора. Установлено, что существующие критериальные зависимости границ устойчивого течения в отсутствии вихрей Тейлора не учитывают переменной ширины канала по длине фильтровальной перегородки, дополнительную закрутку потока при тангенциальном входе потока, проницаемость поверхности вращающейся фильтровальной перегородки.

Рассмотрены существующие теоретические подходы к определению характеристик ГФ. При этом показано, что существующие методики расчета гидродинамических фильтров не учитывают предложенную организацию течения и не могут быть использованы для расчета эффективности сепарации частиц центробежным полем в рабочем канале гидродинамического фильтра.

Проанализированы основные методы исследования течения псевдопластичных жидкостей в каналах при сложном силовом воздействии. В силу многофакторности силовых механизмов и нелинейности вязкости широкое распространение получили численные методы исследования гидродинамических процессов.

На основании анализа научно-технической литературы и требований инженерной практики сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

**В Главе 2** представлена математическая модель и результаты численного моделирования гидродинамических и сепарационных процессов в ГФ с вращающейся ФП и тангенциальным вводом потока. В основе разрабатываемой математической модели – геометрическая 3-Д модель проточного объема гидродинамического фильтра, состоящая из трех структурных полостей, показанная на Рисунке 1. Геометрические размеры расчетной модели, показанной на Рисунке 2, соответствуют реальному разработанному модельному фильтру.

Разработанная модель двухфазного течения в Эйлеровой постановке представляет собой совокупность уравнений Навье–Стокса в компонентах тензора напряжений, уравнения неразрывности с учетом нелинейности

вязкости в виде реологического уравнения среды. В модели приняты следующие допущения: процесс стационарный, жидкость несжимаема, теплоперенос не учитывается, фильтровальная перегородка моделируется эквивалентным гидравлическим сопротивлением; твердые частицы сферической формы.

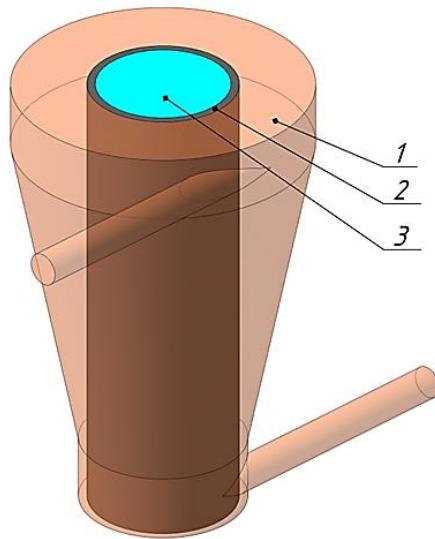


Рисунок 1. Основные элементы структурного аналога ГФ:  
1 – полость сепарации частиц загрязнений; 2 – ФП; 3 – полость очищенной жидкости

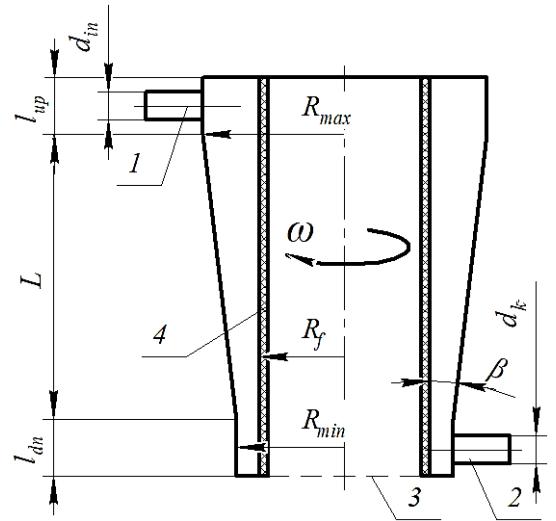


Рисунок 2. Расчетная модель ГФ:  
1 – верхний тангенциальный патрубок; 2 – нижний тангенциальный патрубок; 3 – слив очищенной жидкости; 4 – ФП

- Уравнение неразрывности для жидкой фазы:

$$\nabla \cdot (\rho_f \alpha_f U_f) = 0, \quad (1)$$

где  $U_f$  – вектор скорости жидкой фазы, м/с;  $\rho_f$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_f$  – объемная доля жидкой фазы.

- Уравнение неразрывности твердой фазы:

$$\nabla \cdot (\rho_s \alpha_s U_s) = 0, \quad (2)$$

где  $U_s$  – вектор скорости твердой фазы, м/с;  $\rho_s$  – плотность частиц твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_s$  – объемная доля твердой фазы.

- Уравнение сохранение импульса для жидкой фазы:

$$\begin{aligned} & \rho_f \alpha_f U_f \cdot \nabla U_f = \\ & = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \left( \alpha_f \mu_f \left( \nabla U_f + (\nabla U_f)^T \right) \right) - 2\rho_f \omega \times U_f - \rho_f \omega (\omega \times r) - F_{fs}^D + S_i, \quad (3) \end{aligned}$$

где  $p$  – давление, Па;  $\mu_f$  – суммарная вязкость жидкой фазы, Па·с;  $\omega$  – круговая частота, обусловленная вращением потока, рад/с;  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор;  $F_{fs}^D$  – сила сопротивления, Н;  $S_i$  – коэффициент, учитывающий вязкостную и инерционную составляющую в  $i$ -м направлении оси координат (коэффициенты Дарси и Форхгеймера), значение которого равны нулю для непористых зон фильтра (полости 1 и 3),

$$S_i = \frac{\mu_{eff}}{\Pi_i} U_{fi} - K_{li} \frac{\rho_f}{2} |U_f| U_{fi}, \quad (4)$$

где  $\mu_{eff}$  – эффективная вязкость псевдопластичной жидкости, Па·с;  $\Pi_i$  – проницаемость, м<sup>2</sup>,  $K_{li}$  – инерционный коэффициент Форхгеймера, 1/м.

- Уравнение сохранение импульса для твердой фазы:

$$\rho_s \alpha_s U_s \cdot \nabla U_s = -\alpha_s \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_s \mu_s (\nabla U_s + (\nabla U_s)^T)) - 2\rho_s \omega \times U_s - \rho_s \omega (\omega \times \mathbf{r}) - F_{fs}^D. \quad (5)$$

- Уравнения двухпараметрической модели турбулентности  $k$ - $\varepsilon$ :

$$\nabla \cdot \left( \alpha_f \left( \rho_f U_f k_f - \left( \mu_{eff} + \frac{\mu_{tf}}{\sigma_k} \right) \nabla k_f \right) \right) = \alpha_f (P_f - \rho_f \varepsilon_f), \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \left( \alpha_f \left( \rho_f U_f \varepsilon_f - \left( \mu_{eff} + \frac{\mu_{tf}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_f \right) \right) = \alpha_f \frac{\varepsilon_f}{k_f} (C_{\varepsilon 1} P_f - C_{\varepsilon 2} \rho_f \varepsilon_f), \quad (7)$$

где  $k_f$  – турбулентная кинетическая энергия, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $\varepsilon_f$  – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $P_f$  – турбулентная составляющая, обусловленная наличием вязких сил для несжимаемого потока,

$$P_f = \mu_{tf} \left( \frac{\partial U_{fi}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_{fi}}{\partial x_j}. \quad (8)$$

- Суммарная вязкость жидкой фазы

$$\mu_f = \mu_{eff} + \mu_{tf}, \quad (9)$$

где  $\mu_{tf}$  – турбулентная вязкость, Па·с.

Эффективная вязкость псевдопластичной жидкости согласно степенному закону Оствальда–де Виля

$$\mu_{eff} = 2k |\sqrt{2A}|^{n-1}, \quad (10)$$

где  $n$  – индекс течения;  $A$  – интенсивность тензора скоростей деформаций,

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_{fi}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_i} \right). \quad (11)$$

Для модели  $k$ - $\varepsilon$  турбулентная вязкость определяется как

$$\mu_{tf} = C_\mu \rho_f \left( \frac{k_f^2}{\varepsilon_f} \right), \quad (12)$$

где  $C_\mu$  – константа,  $C_\mu = 0,09$ .

- Сила сопротивления при межфазном взаимодействии жидкости фазы и твердой частицы

$$F_{fs}^D = \frac{3C_D}{4d} \alpha_s \rho_f |U_f - U_s| (U_f - U_s), \quad (13)$$

где  $d$  – диаметр твердой частицы;  $C_D$  – коэффициент сопротивления для твердых частиц определяется моделью Шиллер-Наумана,

$$C_D = \max \left[ \frac{24}{Re'} (1 + 0,15 Re'^{0,687}), 0,44 \right]; Re' = \frac{\rho_f |U_f - U_s| d}{\mu_{eff}}. \quad (14)$$

В результате численного эксперимента установлено, что течение в рабочей зоне ГФ является суперпозицией известных течений, каждое из которых может быть неустойчивым: напорное течение с тангенциальным вводом жидкости, аналогичное течению в гидроциклоне, и цилиндрическое течение Куэтта-Тейлора, вызванное вращением внутреннего цилиндра, с возможным образованием вихрей Тейлора. Результаты численного расчета структур потока в ГФ показаны на Рисунке 3.

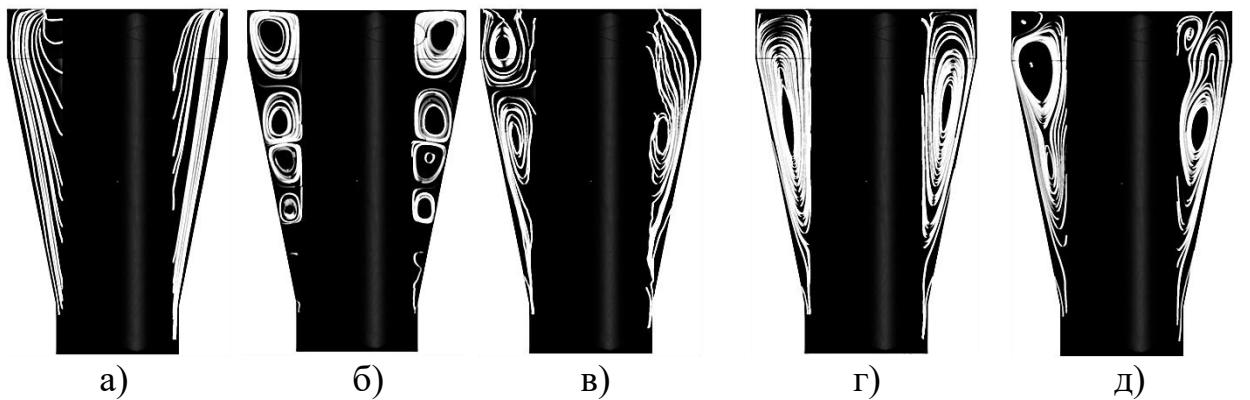


Рисунок 3. Возможные варианты потоков в рабочем канале ГФ:  
 а) спиральное течение; б) вихри Тейлора; в) переходный режим  
 (подкрышечный цилиндрический вихрь и формирование циркуляционного  
 течения); г) замкнутый кольцевой вихрь; д) сложное многовихревое течение

Принимая во внимание многочисленные исследования устойчивого течения в гидроциклоне и его разделяющей способности, предпочтительной является структура течения в ГФ в виде нисходящего циркуляционного

течения. Для данной структуры потока установлено, что профиль тангенциальной скорости  $\bar{v}_{tg}$  во входной зоне фильтра зависит от величины  $m$ , характеризующей отношение средней скорости на входе в фильтр  $v_{in}^{tg}$  к окружной скорости вращения ФП  $v_f^{tg}$ , где  $v_f^{tg} = \omega R_f$ ,  $r$  – текущий радиус ФП:

$$\bar{v}_{tg} = \frac{v_{tg}(r)}{v_f^{tg}}; m = \frac{v_{in}^{tg}}{v_f^{tg}}. \quad (15)$$

Вычислительным экспериментом подтверждено, что определяющими параметрами формирования циркуляционного течения, и как следствие, процесса сепарации частиц, будут являться скорости потока во входной зоне, для которого профиль тангенциальной скорости удовлетворительно аппроксимируется функцией закона окружных скоростей вида  $v_\phi r^g = const$ , где  $v_\phi$  – тангенциальная скорость;  $g$  – константа;  $r$  – текущий радиус рассматриваемой точки по отношению к геометрической оси аппарата. График тангенциальной скорости  $\bar{v}_{tg}$  представлен на Рисунке 4.

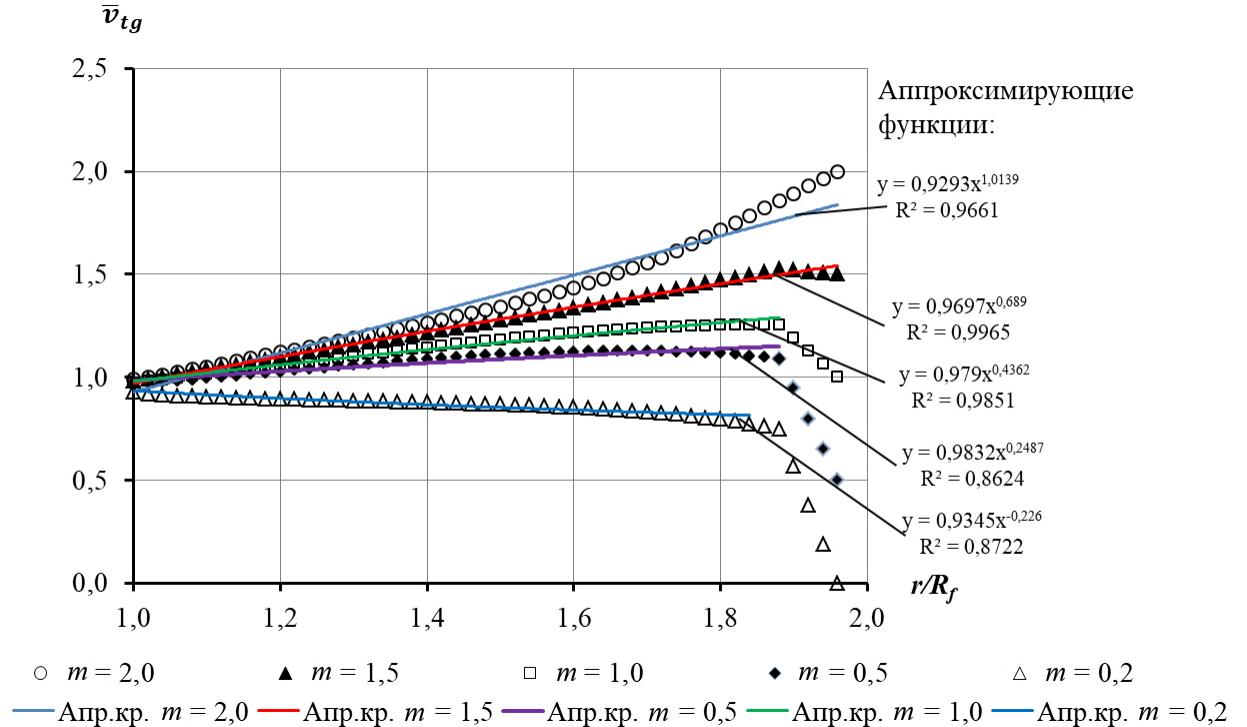


Рисунок 4. Радиальное распределение тангенциальной скорости в кольцевой области фильтра в зоне входного патрубка при  $Re_\phi = 480$  ( $v_f^{tg} = 7,1$  м/с) и аппроксимирующие степенные функции

В результате моделирования были получены распределения безразмерной эффективной вязкости по рабочему каналу ГФ для неподвижной и вращающейся ФП при индексе течения  $n$  псевдопластичной

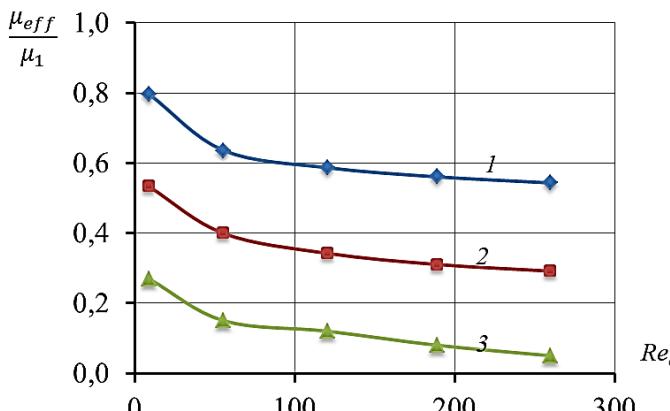


Рисунок 5. Зависимость безразмерной величины эффективной вязкости псевдопластичной жидкости от окружного числа Рейнольдса  $Re_\phi$ : 1 –  $n = 0,9$ ; 2 –  $n = 0,8$ ; 3 –  $n = 0,5$

жидкости, которые подтверждают, что закрутка потока способствует снижению эффективной вязкости от 20 до 30 % по сравнению с неподвижной ФП. Результаты расчета представлены на Рисунке 5, где  $\mu_{eff}$  – средняя эффективная вязкость во входной зоне ГФ;  $\mu_1$  – эффективная вязкость при  $n = 1$ . Было выявлено, что с увеличением частоты вращения ФП эффективная вязкость снижается, однако существует предел снижения вязкости, когда дальнейшее увеличение частоты не приводит к сколько-нибудь значимому снижению вязкости.

Далее в численном эксперименте определялась эффективность сепарации частиц центробежным механизмом в ГФ в зависимости от частоты вращения ФП  $\omega$ , представленная на Рисунке 6 (расход  $Q = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  и плотность частиц  $2500 \text{ кг}/\text{м}^3$ ):

$$\eta_c = \frac{N_k}{N_b} \cdot 100 \%, \quad (16)$$

где  $N_b$ ,  $N_k$  – счетная концентрация частиц в пробах на входе в ГФ и выходе концентрата загрязнений, соответственно. Было установлено, что определяющими параметрами процесса сепарации частиц центробежным полем являются режимные параметры, свойства дисперсной фазы и свойства дисперсионной среды.

На основе серии проведенных расчетов сделаны рекомендации по выбору оптимальной частоты вращения ФП при известном среднемедианном размере частиц и индексе течения псевдопластичной жидкости.

**В Главе 3** представлена экспериментальная верификация полученных результатов. С этой целью были разработаны и изготовлены опытный образец гидродинамического фильтра, показанный на Рисунках 7, 8, и экспериментальный стенд на базе лаборатории кафедры Э9 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Экспериментальный стенд состоит из системы подачи жидкости, блоков контроля расхода и давления потока, частоты вращения фильтровальной перегородки, дисперсного состава загрязнений и автоматизированной системы управления, представленный на Рисунке 9.

В эксперименте использовались индустриальное масло И40А ГОСТ 20799-88 в качестве высоковязкой жидкости и 0,4 % водный раствор сополимера акриловой кислоты и аллиловых эфиров пентэритрита

(САКАП) в качестве псевдопластичной жидкости; частицы порошка карбида бора в качестве загрязнителя.

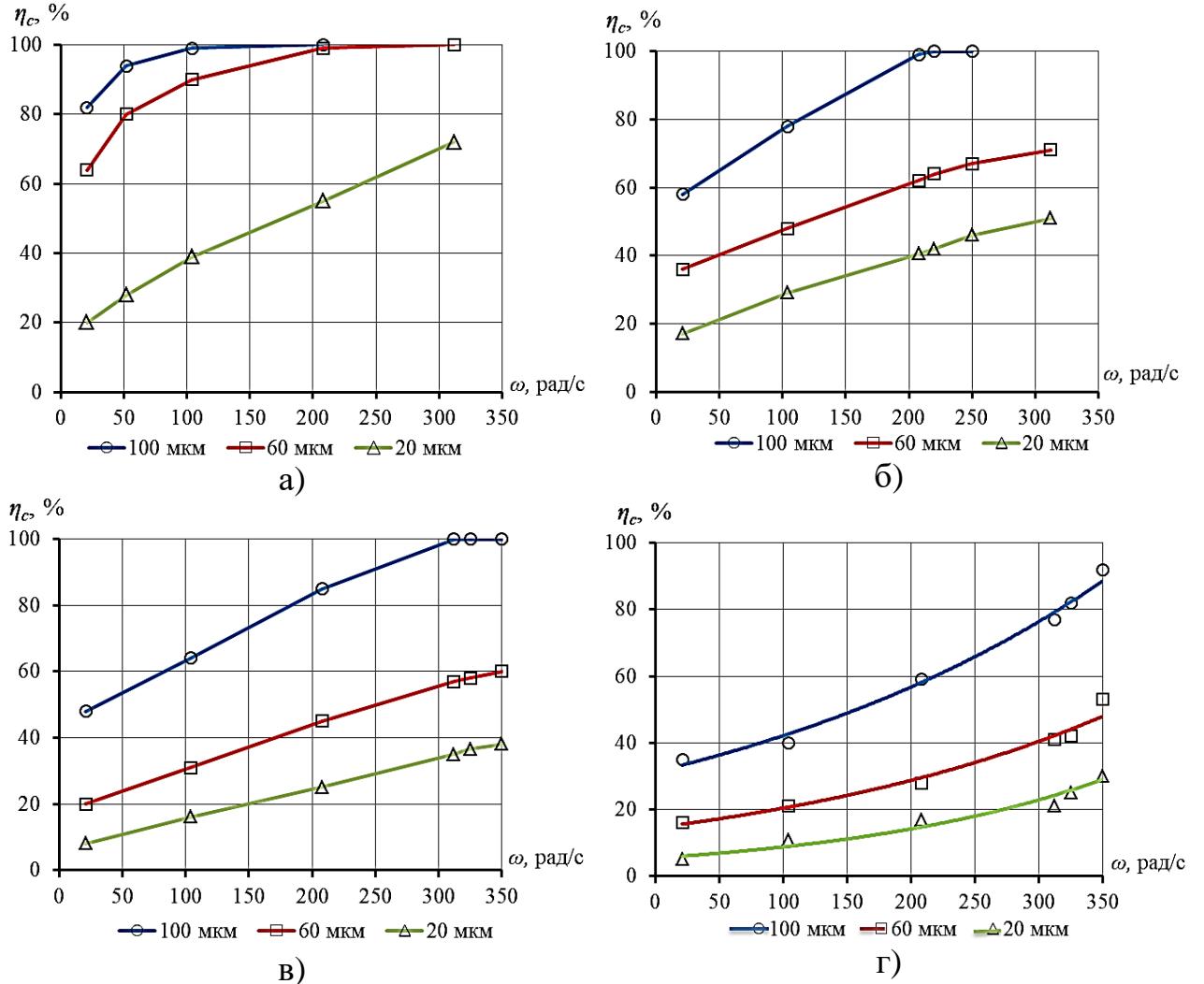


Рисунок 6. Эффективность сепарации частиц центробежным механизмом:  
а)  $n = 0,5$ ; б)  $n = 0,8$ ; в)  $n = 0,9$ ; г)  $n = 1,0$

Приведены методика приготовления неильтоновской жидкости и методика проведения экспериментальных исследований рабочих характеристик опытного образца ГФ. Определен реологический закон водного раствора САКАП. Приводится описание технических характеристик средств контроля и измерения. Выполнена теоретическая оценка ожидаемой погрешности результатов измерения.

Результаты экспериментального определения перепада давления на ФП при различных свойствах дисперсионной среды и режимных параметрах ГФ показаны на Рисунке 10. Экспериментальные точки, полученные при исследовании течения в ГФ САКАП для неподвижной и вращающейся ФП, аппроксимируются линейной зависимостью, имеющей меньший угол наклона к горизонтальной оси, чем ньютонаовская жидкость (индустриальное

масло). При этом вращение ФП позволило снизить перепад давления на 17 %, что коррелируется с уменьшением эффективной вязкости при вращении ФП, установленным в вычислительном эксперименте настоящей работы.

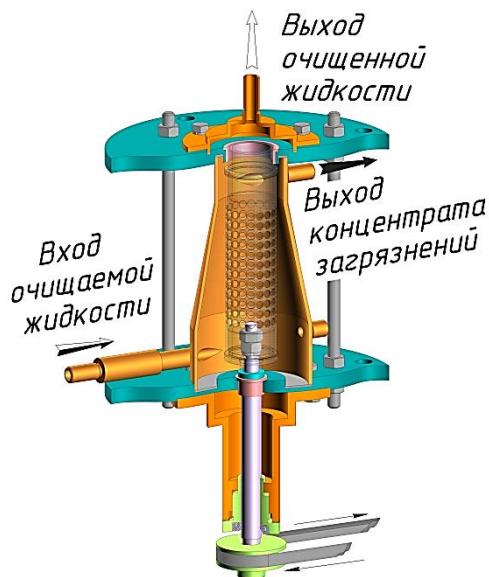
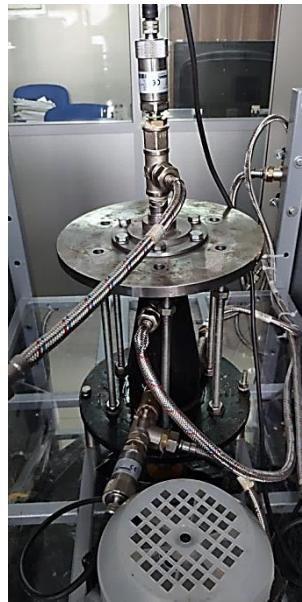


Рисунок 7. Общий вид макета ГФ



а)



б)

Рисунок 8. Фотографии образца ГФ:  
а) ГФ в сборе; б) каркас ФП

Экспериментальные точки, полученные при исследовании течения в ГФ индустриального масла И40А для неподвижной и вращающейся ФП, в пределах погрешности эксперимента, не превышающей 4%, совпадают с теоретической зависимостью, предложенной Финкельштейном З.Л. и дополненной вторым слагаемым суммы, учитывающим вращение ФП. Результаты испытаний представлены на Рисунке 11.

Сравнение теоретических (полученных методами численной гидродинамики) и экспериментальных характеристик эффективности сепарации частиц карбида бора в ГФ центробежным механизмом для САКАП представлено на Рисунке 12. Разница между теоретическими и экспериментальными значениями эффективности составила менее 10 %, что приемлемо для инженерных расчетов. Таким образом, экспериментально подтверждена достоверность данных, полученных с использованием методов вычислительной гидродинамики.

В Главе 4 представлена разработанная методика расчета процесса очистки высоковязких и псевдопластичных жидкостей от твердых примесей в ГФ, которая реализуется при помощи алгоритма, представленного в виде блок-схемы на Рисунке 13.

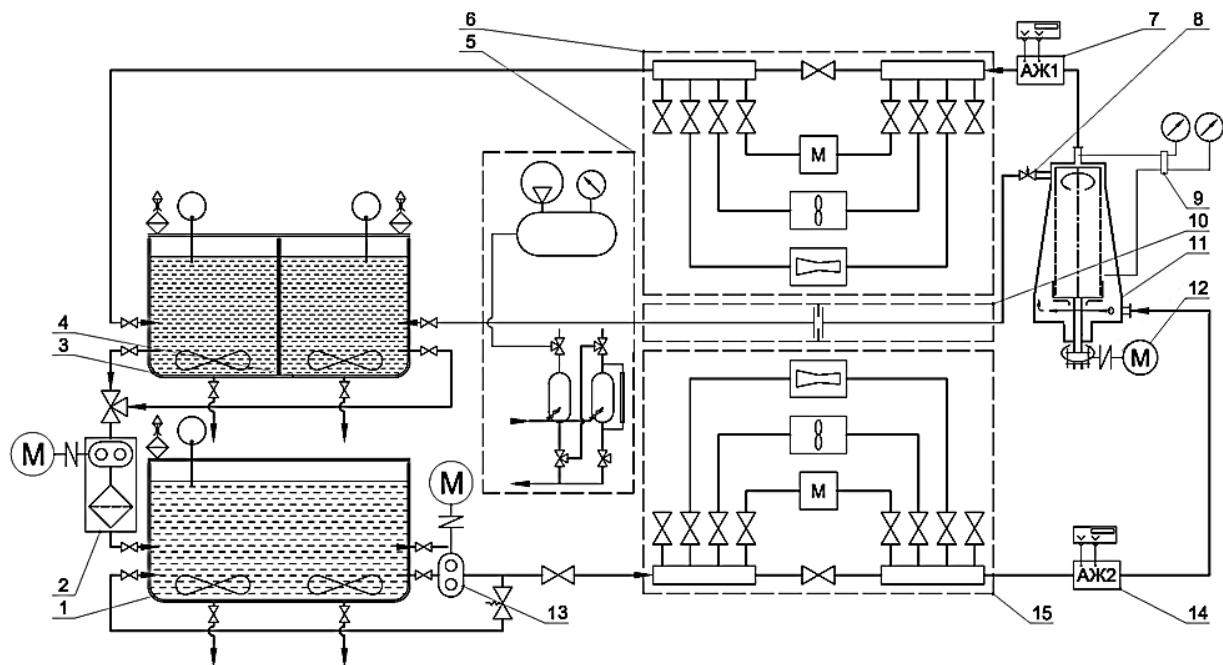


Рисунок 9. Принципиальная схема экспериментального стенда:

1 – резервуар исходной жидкости; 2 – блок тонкой очистки; 3 – резервуар очищенной жидкости; 4 – резервуар концентратов загрязнений; 5 – система подачи жидкости компрессором; 6 – блок контроля расхода исходной жидкости; 7 – блок контроля загрязнений в очищенной жидкости; 8 – вентиль балансировочный регулирования расхода перепускаемой жидкости; 9 – датчик перепада давления; 10 – блок контроля расхода загрязненной жидкости; 11 – гидродинамический фильтр; 12 – электродвигатель с системой регулирования частоты вращения; 13 – насос шестеренчатый; 14 – блок контроля загрязнений в исходной жидкости; 15 – блок контроля расхода очищенной жидкости

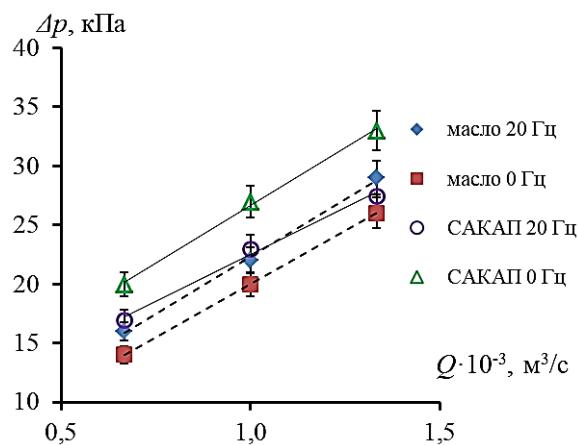


Рисунок 10. Расходные характеристики ГФ при неподвижной и вращающейся ФП

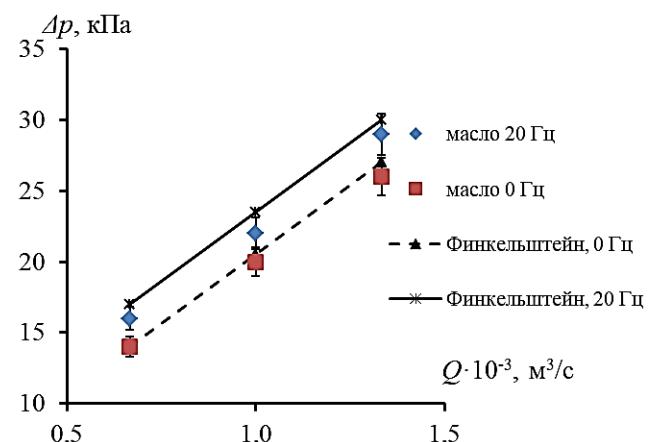


Рисунок 11. Сопоставление экспериментальных результатов определения перепада давления на ГП

На основании исходных данных подбирается ФМ из требований к тонкости очистки; рассчитываются конструктивные параметры ГФ; по номограмме, составленной на основании результатов численного моделирования, определяются частота вращения ФП; с помощью численного расчёта по предложенной модели в CFD-программах определяются гидродинамические и сепарационные характеристики; в случае необходимости, производится их корректировка. Выполнен пример расчета ГФ по разработанной методике.

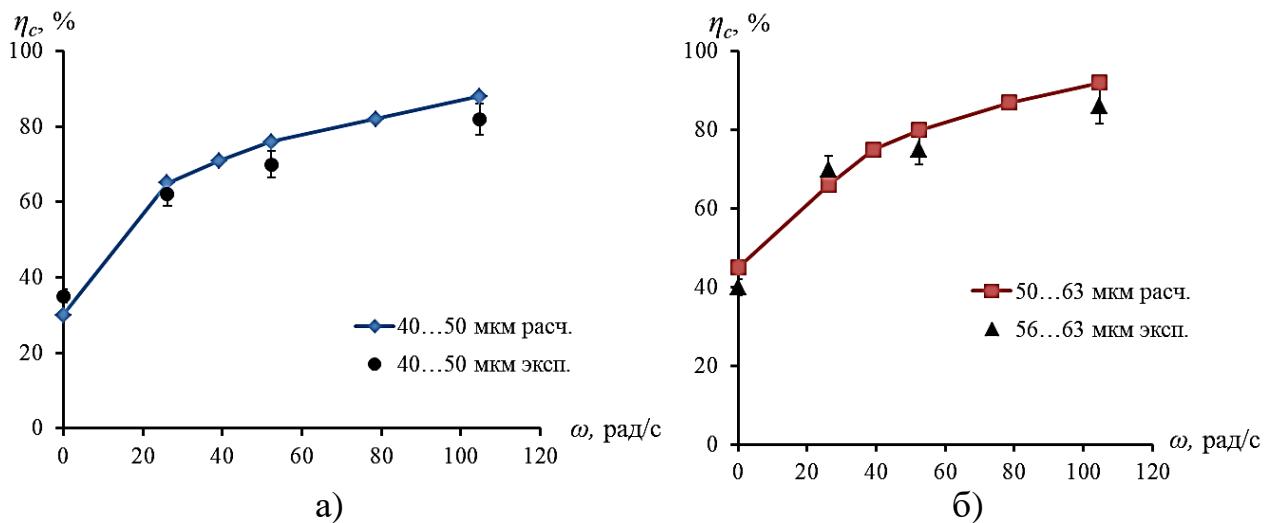


Рисунок 12. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик для САКАП: а) фракция от 40 до 50 мкм; б) фракция от 50 до 63 мкм

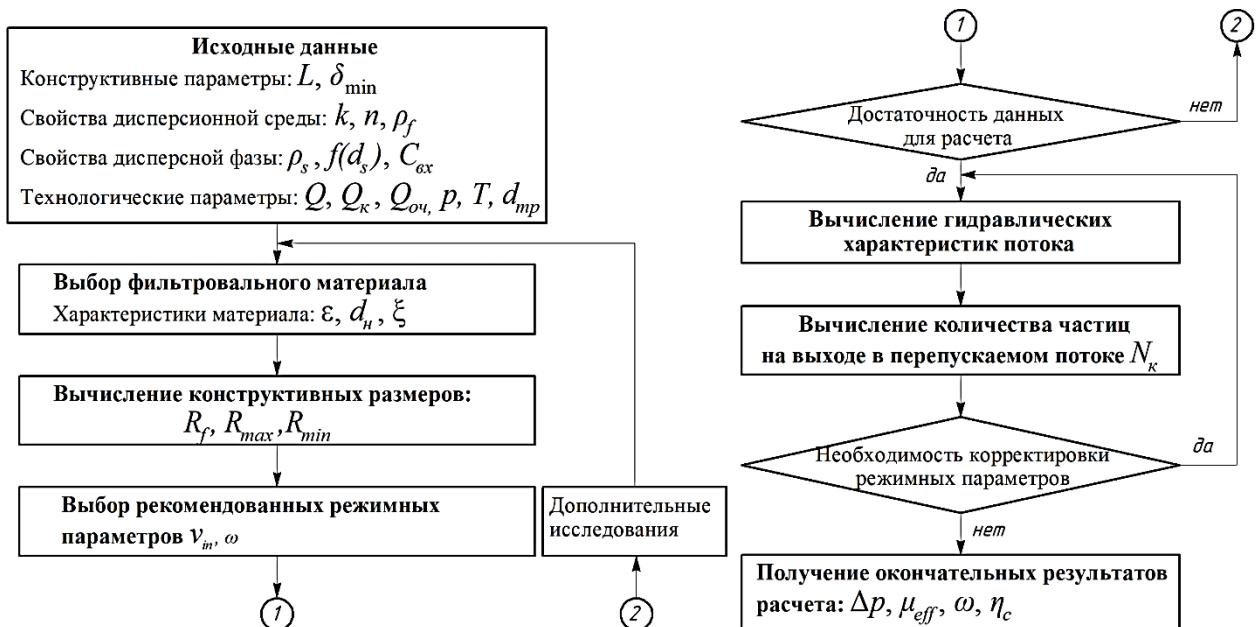


Рисунок 13. Блок-схема методики расчета процесса очистки высоковязких и псевдопластичных жидкостей от твердых примесей в ГФ

## ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые предложено и показано, что гидродинамическое фильтрование с закруткой потока за счет вращения ФП и тангенциального ввода очищаемой жидкости позволяет использовать эффект снижения эффективной вязкости псевдопластичной жидкости за счет создания дополнительных скоростей сдвига; установлено, что закрутка потока в рабочей зоне ГФ позволяет уменьшить эффективную вязкость псевдопластичной жидкости до 30 % в зависимости от индекса течения.

2. Впервые выполнено комплексное моделирование процессов гидродинамики и сепарации дисперсной фазы в ГФ с вращающейся ФП и тангенциальным вводом очищаемой жидкости, с учетом современных компьютерных технологий в области вычислительной гидродинамики, на основе многофазной модели, позволяющей определить гидродинамические характеристики, структуру потока в рабочем канале ГФ, эффективность сепарации твердых частиц.

3. Установлено, что структура потоков в рабочей зоне ГФ определяется соотношением скоростей между скоростью вращения ФП и тангенциальной скоростью на входе в рабочую зону ГФ. Показано, что устойчивое течение возможно при наличии циркуляционного вихря в рабочей зоне ГФ, при этом окружная скорость потока на входе в ГФ подчиняется закону окружных скоростей.

4. Установлено, что определяющими параметрами процесса разделения в центробежном поле ГФ с вращающейся ФП и тангенциальным вводом очищаемой жидкости являются режимные параметры фильтра, реологические свойства дисперсионной среды и свойства дисперсной фазы.

5. Создан экспериментальный стенд на основе образца ГФ с вращающейся ФП и тангенциальным вводом очищаемой жидкости, позволяющий проводить натурные исследования гидродинамических и сепарационных характеристик для высоковязких и псевдопластичных жидкостей.

6. Численным методом получены и экспериментально подтверждены значения эффективности сепарации частиц центробежным полем в ГФ с вращающейся ФП и тангенциальным вводом очищаемой жидкости.

7. Разработана методика расчета ГФ с вращающейся ФП и тангенциальным вводом очищаемой жидкости, позволяющая профилировать проточные части ГФ, определять гидродинамику потоков и сепарационные характеристики и сократить объем необходимых экспериментальных исследований.

8. Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе МГТУ им. Н. Э. Баумана, что подтверждено актом внедрения.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Моделирование работы гидродинамического фильтра с использованием программного комплекса // Безопасность в техносфере. 2009. № 5. С. 21-30. (0,8 п.л./0,7 п.л.)
2. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Исследование поведения частиц в гидродинамическом фильтре на основе численных расчетов // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, № 1 (9). С. 2216-2222. (0,6 п.л./0,5 п.л.)
3. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Аналитический расчет динамики неильтоновской жидкости в гидродинамическом фильтре // Безопасность в техносфере. 2011. № 4. С. 51-56. (0,6 п.л./0,5 п.л.)
4. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю., Агалакова Н.А. Исследование гидравлических характеристик течения жидкости в гидродинамическом фильтре с тангенциальной закруткой потока // Вектор науки ТГУ. 2013. № 2 (24). С. 32-37. (0,5 п.л./0,35 п.л.)
5. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Границы устойчивости в гидродинамическом фильтре // Безопасность в техносфере. 2013. № 4. С. 26-32. DOI: 10.12737/717 (0,5 п.л./0,4 п.л.)
6. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Гидродинамическое фильтрование // Безопасность в техносфере. 2015. Т. 4, № 3. С. 68-80. DOI: 10.12737/11885 (1,1 п.л./0,9 п.л.)
7. Devisilov V., Sharay E., Myagkov I. Filtering of high solids concentration media using complex powerful to the flow // Safety in Technosphere. 2020. Vol. 9, No. 2. P. 49-53. DOI 10.12737/1998-071X-2021-9-2-49-53 (0,5 п.л./0,3 п.л.)
8. Devisilov V.A., Sharai E.Yu. Hydrodynamics of a Rheologically Complicated Liquid in a Self-Cleaning Filter // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2012. Vol. 46, No. 6. P. 594-600. DOI:10.1134/S0040579512050119 (Web of Science, Scopus) (0,7 п.л./0,6 п.л.)
9. Devisilov V.A, Sharai E. Numerical Study of the Flow Structure in a Hydrodynamic Filter // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2016. Vol. 50. No. 2. P. 209-2016. DOI: 10.1134/S0040579516020044 (Web of Science, Scopus) (0,7 п.л./0,6 п.л.)
10. Devisilov V.A., Sharai E.Yu. Particle Separation in an Annular Converging Channel with an Inner Rotating Permeable Baffle // High Temperature. 2018. Vol. 56, Issue 4. P. 576-580. DOI: 10.1134/S0018151X18040053 (Web of Science, Scopus) (0,52 п.л./0,42 п.л.)
11. Devisilov V., Sharai E. Numerical investigation of two-phase media separation in the hydrodynamic filter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Hydraulics. 2019. Vol. 492, No. 1. P. 012004. doi:10.1088/1757-899X/492/1/012004 (Scopus) (0,8 п.л./0,7 п.л.)
12. Devisilov V., Sharai E. Hydrodynamic filters in hydraulic fluid cleaning system of hydraulic drive // IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering. Hydraulics. 2019. Vol. 492, No. 1. P. 012025. doi:10.1088/1757-899X/492/1/012025 (Scopus) (0,5 п.л./0,4 п.л.)

13. Devisilov V.A., Sharai E.Y. Filtering highly viscous and severely polluted media using integrated power effect on the liquid flow under cleaning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. SEWAN-2019. 2020. Sci. 408. P. 012016. DOI 10.1088/1755-1315/408/1/012016. (Scopus) (0,5 п.л./0,4 п.л.)

14. Патент на полезную модель № 163482 У1 Российская Федерация, МПК B01D 35/00. Установка для очистки жидких сред от механических загрязнений: № 2016102205/05: заявл. 26.01.2016: опубл. 20.07.2016 / В.А. Девисилов, И.А. Мягков, Е.Ю. Шарай.

15. Патент на полезную модель № 150505 У1 Российская Федерация, МПК B01D 33/29. Фильтр самоочищающийся: № 2014131793/05: заявл. 01.08.2014: опубл. 20.02.2015 / В.А. Девисилов, Е.Ю. Шарай, И.А. Мягков.