

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



УДК 66.061.34

УДК 66.084.2

СТЕПАНОВ
АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ГУМИНОВЫХ
КИСЛОТ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Промтов М. А.

Тамбов 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Анализ закономерностей процесса экстрагирования и расчета роторного импульсного аппарата	10
1.1. Анализ закономерностей процесса экстрагирования	10
1.2. Анализ методов экстрагирования гуминовых кислот	14
1.3. Анализ методов расчета технологических параметров роторных импульсных аппаратов для процесса экстрагирования	16
1.4. Постановка задач исследования процесса экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате	28
Глава 2. Интенсификация процесса экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате.....	30
2.1. Анализ процесса экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате	30
2.2. Расчет основных характеристик роторного импульсного аппарата для процесса экстрагирования.....	37
2.3. Расчет роторного импульсного аппарата с применением информационных технологий	43
2.4. Выводы по главе 2.....	69
Глава 3. Экспериментальные исследования процесса экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате	71
3.1. Описание стендов на базе роторных импульсных аппаратов для экспериментальных исследований	71
3.2. Экспериментальные исследования процесса экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате	75
3.3. Статистическая обработка экспериментальных данных.....	87
3.4. Выводы по главе 3.....	88
Глава 4. Разработка оборудования и технологии экстрагирования гуминовых кислот для получения жидких гуминовых удобрений	89

4.1. Определение направлений повышения эффективности работы роторных импульсных аппаратов.....	89
4.2. Разработка роторных импульсных аппаратов для интенсификации процессов экстрагирования.....	92
4.3. Разработка технологии получения и обеззараживания жидких гуминовых удобрений в роторном импульсном аппарате.....	102
4.4. Выводы по главе 4.....	121
Основные результаты и выводы	123
Список условных обозначений.....	125
Список использованной литературы.....	129
Приложение 1. Описание программного продукта FlexPDE.....	145
Приложение 2. Сценарий расчета потоков жидкости в одной паре каналов ротора и статора роторного импульсного аппарата для программы FlexPDE...	149
Приложение 3. Сценарий расчета потоков жидкости в каналах роторного импульсного аппарата для программы FlexPDE.....	152
Приложение 4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	160
Приложение 5. Контурные графики полей скорости и давления в каналах ротора и статора	161
Приложение 6. Описание алгоритма расчета полей скорости и давления РИА в программном продукте ANSYS.....	178
Приложение 7. Результаты вычислительных экспериментов по определению влияния геометрических и режимных параметров РИА на величины скорости, ускорения, расхода и давления потока жидкости в канале статора.....	189
Приложение 8. Справка о практическом использовании результатов исследований в ООО «Амальтеа-сервис».....	208
Приложение 9. Решение о выдаче патента на полезную модель РФ № 147138.....	209

Приложение 10. Решение о выдаче патента на полезную модель РФ № 147138.....	212
Приложение 11. Справка о практическом использовании результатов исследований в ООО «Биогумус»	213
Приложение 12. Протокол испытаний №169/176.....	214

Введение

Интенсификация, увеличение производительности и снижение энергозатрат процесса экстрагирования является актуальной задачей для различных отраслей промышленности. Основным направлением интенсификации процессов экстрагирования является проектирование, создание и внедрение высокоэффективных технологических аппаратов с высокой степенью воздействия на обрабатываемые вещества.

Для интенсификации процессов экстрагирования в основном применяются три метода - это увеличение площади поверхности контакта фаз, увеличение скорости обтекания частиц, а так же комбинация этих методов.

Одним из перспективных методов экстрагирования из твердого в жидкость является процесс экстрагирования в роторном импульсном аппарате (РИА), где экстрагирование осуществляется за счет механических, гидродинамических и акустических факторов воздействия на обрабатываемую суспензию. Интенсивное физическое воздействие инициировано пульсациями давления и скорости потока в каналах ротора и статора, в рабочей камере, больших градиентов скоростей в зазоре между ротором и статором, турбулентности и развитого эффекта кавитации. Данные виды воздействия способствуют увеличению поверхности фазового контакта и относительных скоростей движения фаз, что в свою очередь, способствует интенсификации экстрагирования целевых компонентов при относительно низких энергетических затратах.

В связи со сложностью и многообразием всего комплекса воздействий на обрабатываемую жидкость в РИА необходимо всестороннее исследование физических и физико-химических явлений, имеющих место в РИА при обработке жидких гетерогенных сред под воздействием мощных пульсационных течений, существенно влияющих на интенсивность технологических процессов; научное обоснование и разработка высокоэффективных технологических аппаратов с импульсным воздействием на обрабатываемую жидкую гетерогенную среду; широкое внедрение в промышленность гидромеханических аппаратов с

многофакторным импульсным воздействием; исследование комплексного воздействия на обрабатываемую гетерогенную жидкость различных физических факторов, интенсифицирующих химико-технологические процессы.

Большой вклад в развитие методов расчета и интенсификации химико-технологических процессов в роторных аппаратах внесли Балабудкин М.А., Балабышко А.М., Барам А.А., Басок Б.И., Биглер В.И., Богданов В.В., Зимин А.И., Промтов М.А., Фомин В.М., Червяков В.М., Юдаев В.Ф., Cooke M., Kowalski A.J., Willems P. и другие исследователи.

Актуальность работы.

Гуминовые кислоты (ГК) применяются как составляющие красителей, ингибиторов коррозии, лекарственных препаратов, буровых растворов, стимуляторов роста растений. Водорастворимые ГК являются хорошими детоксикантами, образуя прочные комплексы с ионами тяжелых металлов и органическими токсинами. Разработка технологий и оборудования для интенсификации процесса экстрагирования ГК в водные растворы из различного гуматосодержащего сырья имеет большую актуальность для химической, пищевой, фармацевтической, аграрной и других отраслей промышленности.

Перспективным научно-техническим направлением является разработка высокоэффективных аппаратов с многофакторным воздействием на обрабатываемую среду за счет дискретного ввода в рабочую зону импульса энергии большой плотности. К оборудованию, реализующему импульсное воздействие для процессов экстрагирования, относят роторные импульсные аппараты (РИА), принцип работы которых основан на нестационарности потоков вещества, энергии и импульса. Для интенсификации процесса экстрагирования актуально совершенствование и научное обоснование методов расчета их основных характеристик, внедрение в промышленность, исследование комплексного воздействия РИА на суспензию гуматосодержащего сырья.

Цель работы.

Исследование и интенсификация процесса экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате.

Задачи исследования:

- анализ процесса экстрагирования в РИА для интенсификации процесса экстрагирования ГК из гуматосодержащего сырья.
- анализ методов расчета, разработка и применение программных продуктов для расчета параметров РИА, влияющих на интенсивность процесса экстрагирования;
- экспериментальные исследования и уточнение кинетических закономерностей процесса экстрагирования ГК из биогумуса в РИА;
- разработка новых конструкций РИА для интенсификации процесса экстрагирования;
- экспериментальные исследования и разработка технологии экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса и получения жидких гуминовых удобрений.

Научная новизна.

Разработана и экспериментально подтверждена технология экстрагирования ГК из биогумуса и получения жидких гуминовых удобрений.

Экспериментально определены коэффициенты критериального уравнения для расчета кинетических закономерностей процесса экстрагирования ГК из биогумуса в РИА.

Для расчета производительности и мощности РИА определен вид поправочной функции и эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние центробежных сил и вязкости на течение жидкости в полости ротора.

Впервые экспериментально исследовано влияние обработки суспензии гуминовых удобрений в РИА на клетки бактерий, спор и мицелия грибов, макроскопических грибов, которое показало их многократное снижение.

Практическая значимость.

Доказана эффективность применения РИА для интенсификации процесса экстрагирования ГК из биогумуса.

Уточнены критериальные зависимости для расчета коэффициента массопередачи по жидкой фазе для процесса экстрагирования ГК в РИА.

Разработана программа расчета на ЭВМ полей скорости и давления в РИА (Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010612236).

Разработаны новые конструкции РИА для обработки суспензий, защищенные патентами РФ на полезную модель № 130877 и № 147138.

Рекомендации по соотношению основных параметров РИА ($5 \leq l_{p,c}/a_{p,c} \leq 10$; $250 \leq R_p/\delta \leq 1250$; $5 \leq h_{p,c}/a_{p,c} \leq 15$; $144 \leq z/R_p \leq 480$) используются для изготовления и эксплуатации РИА в ООО «Амальтеа-Сервис» (г. Москва).

Разработана технологическая схема и даны рекомендации по соотношению твердой и жидкой фазы суспензии ($4 \leq L/G \leq 10$) для процесса экстрагирования ГК из биогумуса, принятые к внедрению в ООО «Биогумус» (г. Тамбов).

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы были доложены на 8-и международных научных конференциях:

международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов 2010, Волгоград 2012, Саратов 2013, Тамбов 2014);

международная конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии» (Москва 2011);

конференция молодых ученых «Теоретическая и экспериментальная химия жидкофазных систем» (Иваново 2012);

конференция молодых ученых «Теоретическая и экспериментальная химия жидкофазных систем» (Иваново 2012);

международная научно- практическая конференция «Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества» (Тамбов 2013);

научно- практическая конференция «Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития» (Тамбов 2013, Тамбов 2014);

международная научно-техническая конференция «Проблемы ресурс- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (Иваново 2014).

Публикации.

Материалы диссертации изложены в 28-ми публикациях, из них 4 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2-х патентах и 1-ой программе на ЭВМ.

Объем и структура работы.

Диссертация включает введение, четыре главы, основные выводы и результаты, список литературы (147 наименований) и приложения. Работа изложена на 120 страницах основного текста, содержит 64 рисунка, 5 таблиц и 11 приложений.

Методология и методы исследования.

Для расчета технологических параметров производительности (Q), потребляемой мощности (N) и импульсного давления (P_u) определяющего эффективность работы РИА, проведен анализ существующих методик расчета параметров и характеристик аппарата, определены формулы, применимые к инженерному расчету. На основе экспериментальных исследований подобраны эмпирические коэффициенты, согласующие расчетные и экспериментальные данные по предложенным формулам.

Глава 1. Анализ закономерностей процесса экстрагирования и расчета роторного импульсного аппарата

1.1 Анализ закономерностей процесса экстрагирования

Способы интенсификации массообменных процессов в системах с твердой фазой по механизму воздействия на кинетику диффузионного переноса можно условно разделить на три группы [1]:

- 1) способы, основанные на развитии поверхности фаз;
- 2) способы, основанные на увеличении скорости обтекания твердых частиц жидкостью;
- 3) комбинированные способы.

Интенсификацию массообменных процессов в роторном импульсном аппарате (РИА) необходимо отнести к комбинированным способам [2]. Развитие поверхности контакта фаз осуществляется за счет разрушения твердых частиц с образованием новых поверхностей. Макротурбулентные пульсации скорости потока жидкости при импульсном вводе в канал статора создают большие градиенты скоростей жидкости относительно твердых частиц, а так же способствуют постоянному обновлению поверхности фазового контакта. Вероятен не только импульсный подвод новых порций жидкости, но и срыв диффузионного слоя с поверхности частицы. Благодаря увеличению скорости обтекания частиц жидкостью, процесс экстрагирования лимитируется внутридиффузионным режимом, обеспечивая интенсификацию процесса [2].

Основное воздействие на обрабатываемую гетерогенную среду происходит в зазоре между ротором и статором и в канале статора РИА. При проведении процесса экстрагирования в РИА обрабатываемую жидкость можно подвергнуть нескольким циклам обработки. Так как твердая фаза транспортируется через аппарат жидкостью, то процесс экстрагирования в РИА по способу организации движения твердой и жидкой фазы можно классифицировать как прямоточный процесс.

На процесс переноса вещества оказывают влияние размеры и форма частиц твердого тела, его внутреннее строение, размеры, расположение и вид пор капилляров (открытые, закрытые, сквозные), химический состав частиц твердого тела. Проводить процесс целесообразно с мелкими частицами, предварительно измельчив материал. Механизм переноса вещества в порах зависит от гидродинамического режима перемешивания жидкой фазы и соотношения размеров молекул и пор жидкости. Если размеры молекул жидкости значительно меньше пор, то вещество переносится по механизму конвективной диффузии, если размеры молекул жидкости близки к размерам пор – молекулярной диффузией [1 -11].

Для экстрагирования в системах «твердое - жидкость» в условиях интенсивного смешения и высокоскоростных режимах движения фаз относительно друг друга, характерных для РИА, уравнение по расчету коэффициента массоотдачи записывают в виде [7 – 14].

$$\beta = A \cdot \varepsilon^n \cdot Sc^m, \quad (1.1.1)$$

где: $Sc = \mu / (\rho D)$ – критерий Шмидта; ε – диссипация энергии, Вт/кг; μ – динамическая вязкость, Па·с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; D – коэффициент диффузии, м²/с; $A = 0,267$, $n = 0,25$, $m = -0,75$ – эмпирические коэффициенты [14].

Как правило, для растворения или экстрагирования целевого вещества из твердых частиц в суспензии, требуется подвергать суспензию многократной (несколько циклов) обработке в аппарате. Количество извлеченного целевого вещества за время i -го цикла обработки можно определить по соотношению [14]:

$$M_i = (c_i - c_{i-1}) \cdot Q, \quad (1.1.2)$$

где: M_i – количество извлеченного вещества на i -м цикле, кг/с; c_i , c_{i-1} – концентрации целевого вещества в жидкости после i и $i-1$ циклов экстрагирования, кг/м³; Q – расход суспензии через аппарат, м³/с.

Количество извлеченного на i -м цикле целевого вещества за единицу времени можно определить по закону массоотдачи с поверхности частиц твердой фазы:

$$M_i = \beta_i \cdot S_i \cdot \Delta c_i, \quad (1.1.3)$$

где: β_i – коэффициент массоотдачи на i -м цикле, м/с ; S_i – площадь межфазного контакта на i -м цикле, м²; Δc_i – движущая сила на i -м цикле, определяемая как разность концентраций в твердом теле и в растворе, кг/м³.

Исходя из соотношений этих уравнений, выражение для определения коэффициента массоотдачи на i -м цикле определяется по формуле:

$$\beta_i = \frac{(c_i - c_{i-1}) \cdot Q}{S_i \cdot \Delta c_i}. \quad (1.1.4)$$

В работах [15, 16] предложен метод определения коэффициента массопередачи в жидкой фазе при экстрагировании полисахаридов из растительного сырья электроразрядным методом. Уравнение массопередачи по жидкой фазе представлено в виде

$$dM = L \cdot dc = K_c \cdot (c_p - c) \cdot dS \cdot dt = K_{cv} \cdot (c_p - c) \cdot V_{ж} \cdot dt, \quad (1.1.5)$$

где K_c – истинный коэффициент массопередачи по жидкой фазе, кг раствора/(с·м²); c – концентрация целевого компонента в жидкой фазе, кг/(кг раствора); c_p – равновесная концентрация целевого компонента в жидкой фазе, кг/(кг раствора); dS – изменение площади поверхности контакта фаз, м²; K_{cv} – объемный коэффициент массопередачи, кг раствора/(с·м³); $V_{ж}$ – объем жидкости в экстракторе, м³.

Произведение $K_c dS$ представлено в виде $K_c dS = K_c \sigma V = K_{cv} V_{ж}$, где σ – изменение удельной поверхности контакта фаз, м²/м³; $V_{ж}$ – объем жидкости, м³.

Коэффициент массопередачи по жидкой фазе K_{cv} определяется по формуле

$$K_{cv} = \frac{L(c_{ki} - c_{ni})}{t_i \Delta c_{cpi} \cdot V_{ж}}, \quad (1.1.6)$$

где i – номер рассматриваемого концентрационного интервала; $\Delta c_{ni} = c_p - c_{ni}$; $\Delta c_{ki} = c_p - c_{ki}$; c_p , c_n , c_k – равновесная, начальная и конечная концентрации экстрагируемого вещества в растворе; t_i – время i -го цикла; $\Delta c_{cpi} = (\Delta c_{ni} - \Delta c_{ki}) / \ln(\Delta c_{ni} - \Delta c_{ki})$.

Роторные импульсные аппараты применяются для экстрагирования различных ценных веществ из твердофазного сырья. Применение РИА для

интенсификации процессов экстрагирования в пищевой промышленности описано в литературе [17 – 20, 80, 92, 94].

При использовании РИА в экстрагировании масла из плодов шиповника, облепихи, спиртовом экстрагировании календулы, валерианы, плодово - ягодного сырья, водного экстрагирования танина из листьев сумки, танина из галловых орешков, коры крушины, а также пектина из пектиносодержащего растительного сырья, повышается выход конечного продукта и сокращается время обработки. [17 - 19]. Обработка бобов сои в РИА до клеточного размера позволяет интенсифицировать массообменные процессы извлечения веществ [20].

Применение РИА для интенсификации процессов экстрагирования в химической и медицинской промышленности описано в литературе [19, 21 - 32]. Для экстрагирования каротина из биомассы, мицелиальных антибиотиков, инсулина подкисленным спиртом, применяются РИА с циркуляционной обработкой среды [19, 21]. Применение РИА позволяет интенсифицировать процесс получения гелеобразных фармацевтических систем, полимерных смесей и приводит к сокращению времени производства [23]. При обработке в РИА происходит дорастворение хитозана, механическое расщепление микрогелевых частиц, а также разрушение набухших агломератов триацетата целлюлозы, растворение эвкалимина в этиловом спирте. Растворы, полученные с использованием механической активации, отличаются более низкими значениями вязкости, а также большей однородностью структуры по сравнению с растворами той же концентрации, полученными по традиционным технологиям [24-28, 31, 32]. При обработке древесной зелени ели европейской в РИА в экстракт переходят водорастворимые группы соединений, группы фенольных соединений, группы малополярных соединений, растворимые в водно-щелочном экстракте феноляты или соли кислот [22].

Применение РИА для интенсификации процесса промывки шламов донных отложений от нефтепродуктов показало высокую эффективность процесса экстрагирования [33].

1.2 Анализ методов экстрагирования гуминовых кислот

Гуминовые вещества – это тёмно-коричневые или тёмно-бурые природные органические образования, которые свободно распространены в различных естественных объектах: в почвах и торфах, в углях и сланцах, в морских и озёрных отложениях, в водах озёр и рек. Гуминовые вещества являются источником элементов питания растений и физиологически активных веществ, регулятором физико-химических и биологических свойств почвы, обуславливающих благоприятные водно-воздушный и питательный режимы растений. [34].

К гуминовым веществам относятся гумусовые (перегнойные) кислоты, гумин (негидролизуемый остаток) и прогуминовые вещества (иначе меланины или пара-гуминовые вещества). Гумусовые кислоты природных объектов (как биокосных тел, так и меланинсодержащих организмов) в зависимости от способа выделения подразделяют на 1) гуминовые кислоты, 2) фульвокислоты и 3) гиматомелановые кислоты [34].

Основным подходом к решению задач разделения гумусовых кислот на группы служит использование прямого межфазного массообмена в тех вариантах растворения-осаждения, которые основываются на распределении макромолекул между раствором и осадком (гелем) в зависимости от их размера и состава. Эти варианты обычно включают разделение щелочного раствора гуминовых веществ на сложную смесь веществ, одни из которых, выделяющиеся из фазы раствора при его подкислении, – гуминовые кислоты, а компоненты, остающиеся в надосадочной жидкости – фульвокислоты [34].

Гуминовые кислоты (ГК) – группа темнокрашенных гумусовых кислот, растворимых в щелочах и нерастворимых в кислотах [35]. Гуминовые кислоты относятся к классу высокомолекулярных ароматических полиоксиполикарбоновых кислот. В состав молекул ГК входят конденсированные ароматические ядра, гетероциклы и различные функциональные группы (карбоксильные, гидроксильные, аминогруппы и др.) [36].

ГК представляют собой высокомолекулярные азотсодержащие органические кислоты. Они имеют тёмно-бурую, а в сухом состоянии – даже чёрную окраску. В группу ГК природных объектов (почв, торфов, углей, меланинсодержащих организмов и др.) входят вещества, которые извлекаются различными водными растворами из почвы, например, растворами едкого натра (NaOH), едкого кали (KOH), аммония (NH₄OH), бикарбоната натрия (NaHCO₃), фторида натрия (NaF), пирофосфата натрия (Na₄P₂O₇), щавелевокислого натрия, мочевины (карбамида), органическими растворителями и другими реагентами, и осаждаются из полученных растворов при подкислении последних минеральными кислотами (до pH ~ 1–2) в виде тёмноокрашенного геля. ГК слабо растворимы в воде, с одновалентными катионами (например, K⁺, Na⁺, NH₄⁺) образуют водорастворимые соли, а с двух- и трёхвалентными катионами (например, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe³⁺, Al³⁺) легко выпадают в осадок из растворов [34, 37-39].

В своем исходном природном состоянии ГК обладают малой активностью из-за низкой гидратированности и дисперсности, блокирования их активных центров различными компонентами, в том числе минеральными. В настоящее время актуальна задача получения ГК, обладающих высокой степенью активности, а именно водорастворимых, которые являются хорошим детоксикантом, образуя прочные комплексы с ионами тяжелых металлов и органическими токсинами, которые в комплексе теряют биодоступность [38, 40].

Для увеличения выхода водорастворимых ГК исходное сырье измельчают и экстрагируют слабощелочным раствором гидроксида калия или натрия концентрацией 2,0–4,0% мас., что позволяет сохранить природный состав ГК практически без изменений, так как такая концентрация исключает деструкцию молекул ГК [36, 40].

Увеличение выхода ГК достигают применением физических методов воздействия: гидродинамической и ультразвуковой кавитационной обработкой, электромагнитным полем [41–47]. Для химического модифицирования торфа одним из перспективных методов активации является его ультразвуковая кавитационная обработка в водной среде. Торф, подвергнутый кавитационной

обработке в присутствии пероксида водорода в щелочной среде, изменяет свой химический состав, что вызывает его активацию, происходит увеличение концентрации водорастворимых органических веществ в полученных водных экстрактах от 55 до 102 г/л. При кавитационной обработке торфа пероксидом водорода в водно-аммиачной среде происходит окислительный аммонолиз его органического вещества, что обуславливает связывание азота и сопровождается увеличением его содержания в составе сухих гуминовых препаратов. Азотсодержащий окисленный гуминовый препарат по сравнению с гуминовым препаратом, полученным кавитационной экстракцией водным аммиаком содержит большее количество COOH -групп и меньшее количество фенольных OH -групп [41, 42].

При экстрагировании ГК из торфа при ультразвуковом воздействии установлено, что наблюдается увеличение количества функциональных групп и числа боковых алифатических цепей в составе их молекул [43–45]. Полученные при экстракции в ультразвуковом поле ГК менее конденсированные, имеют меньшее количество атомов в узлах ароматической решетки и меньшую молекулярную массу по сравнению с традиционной тепловой экстракцией. При обработке гидродинамической кавитацией торфа в водном растворе увеличивается концентрация водорастворимых веществ в 2,6–6,8 раза по сравнению с исходным торфом [46, 47]. Аналогичные результаты получены при исследовании экстракции с ультразвуковой обработкой раствора древесной зелени пихты [45].

1.3 Анализ методов расчета технологических параметров роторных импульсных аппаратов для процесса экстрагирования.

Схема одноступенчатого РИА радиального типа показана на рис. 1.3.1, схема одноступенчатого РИА осевого типа показана на рис. 1.3.2. При вращении ротора, его каналы периодически совмещаются с каналами статора. В промежуток времени, когда каналы ротора перекрыты стенкой статора, давление в полости

ротора возрастает, а при совмещении канала ротора с каналом статора давление за короткий период времени сбрасывается, в канал статора распространяется импульс давления. При распространении избыточного давления импульса в канале статора, следом за ним возникает кратковременный импульс пониженного («отрицательного») давления, так как совмещение каналов ротора и статора завершилось, и подача жидкости в канал статора осуществляется только за счет «транзитного» течения из радиального зазора между ротором и статором. Вошедший в канал статора объем жидкости стремится к выходу из канала, и инерционные силы создают локальные зоны понижения давления в жидкости, что вызывает кавитацию [2].

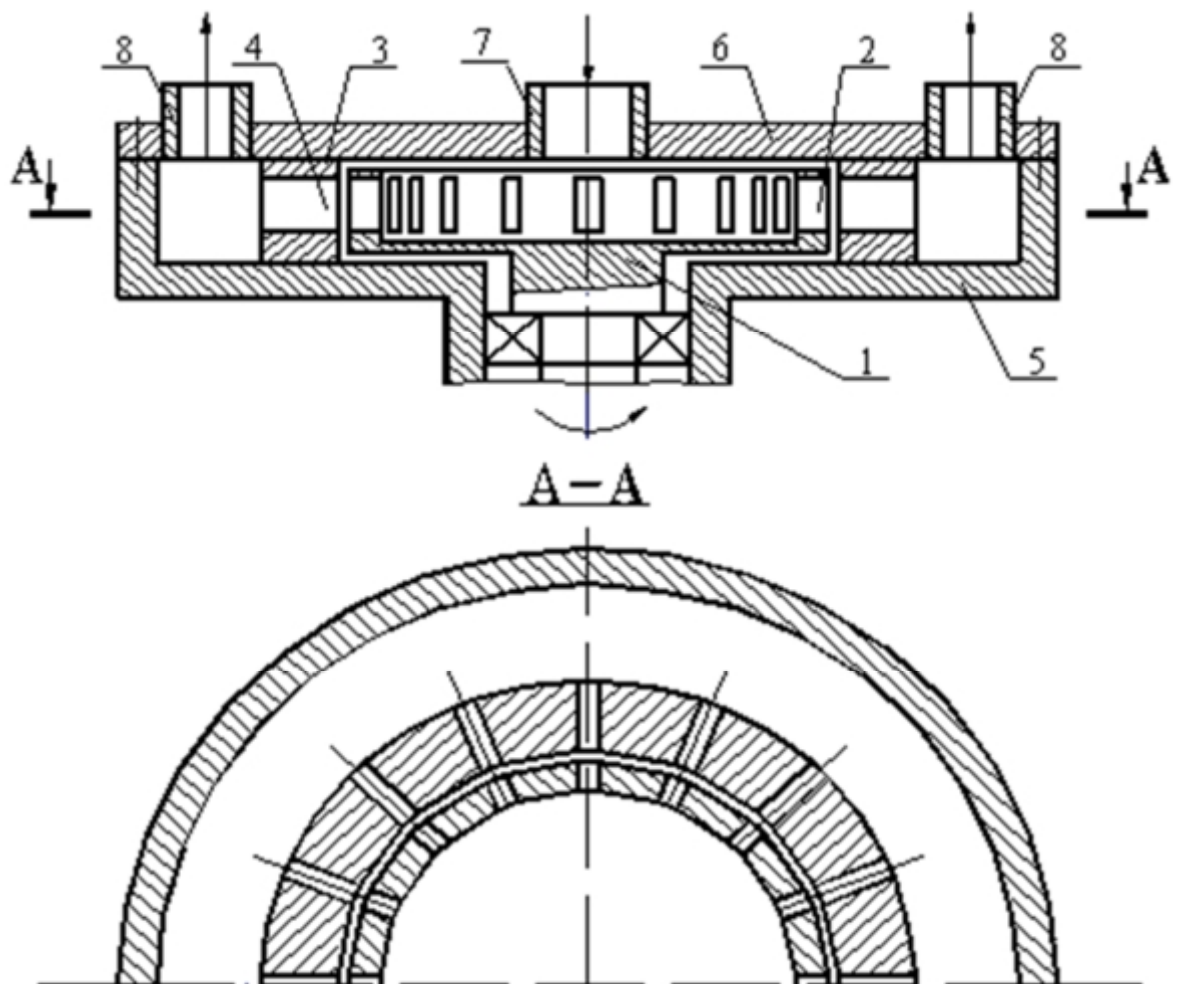


Рис.1.3.1. Схема роторного импульсного аппарата радиального типа:

1 - ротор; 2 - каналы ротора; 3 - статор; 4 - каналы статора; 5 - корпус; 6 - крышка; 7 - входной патрубок; 8 - выходной патрубок.

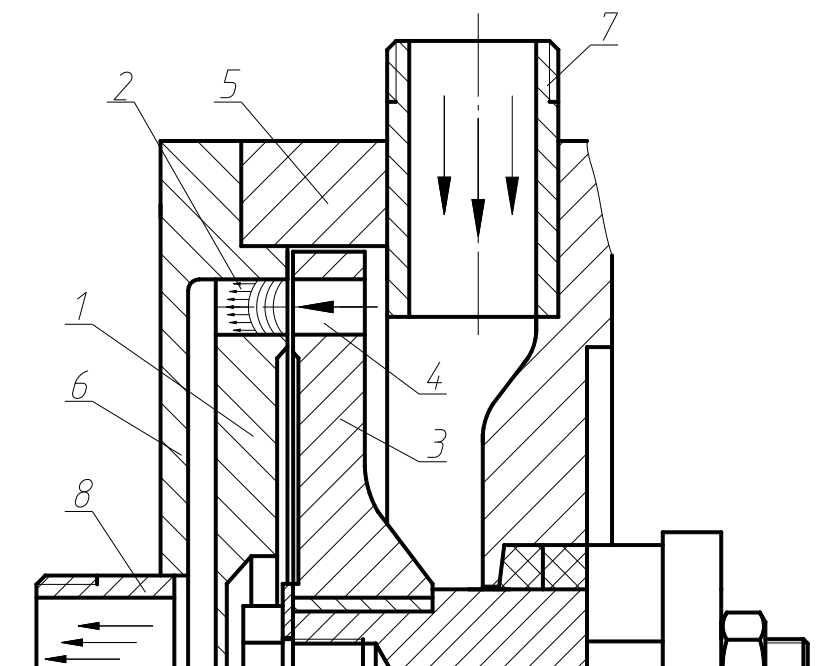


Рис. 1.3.2. Роторный импульсный аппарат осевого типа.

1 - ротор; 2 - канал ротора; 3 - статор; 4 - канал статора; 5 - корпус;
6 - крышка; 7 - входной патрубок; 8 - выходной патрубок.

Схема одной ступени ротор – статор может быть модернизирована в двух вариантах. Первый вариант – это схема с одним ротором и двумя статорами, второй вариант – схема с двумя роторами и одним статором между ними. В первом варианте жидкость из каналов первого статора течет в каналы второго статора за счет перепада давления и центробежного давления, создаваемого в каналах ротора [49]. Во втором варианте перепад давления, движущий поток жидкости, может создаваться центробежными силами в роторах, а также внешним источником давления. Детальный анализ гидро- и термодинамических закономерностей в РИА при компоновке аппарата одной ступенью или двумя ступенями ротор-статор выполнен в монографии [49]. Второй вариант компоновки по сравнению с первым вариантом характеризуется более высоким уровнем тепловыделения за счет диссипации механической энергии, более высоким моментом сил гидродинамического сопротивления, действующих на роторы, и большей амплитудой импульсов давления.

В РИА следует выделить пять основных участков с активными гидродинамическими потоками: полость ротора, канал ротора, зазор между ротором и статором; канал статора, рабочая камера (камера озвучивания). Особое внимание следует обратить на зазор между ротором и статором и канал статора. Основная диссипация энергии, расходуемая на преодоление сил трения при вращении ротора, происходит в зазоре между ротором и статором. Многие исследователи полагают, что основное гидромеханическое воздействие на обрабатываемую среду происходит непосредственно в зазоре между ротором и статором за счет развития в жидкости больших сдвиговых напряжений. Гидродинамическое воздействие на обрабатываемую среду производится в канале статора за счет гидроакустических и гидромеханических факторов: пульсаций давления и скорости потока, кавитационных эффектов, развитой турбулентности.

Основными характеристиками технологического оборудования являются производительность, потребляемая мощность и параметр, определяющий эффективность работы оборудования – импульсное давление в каналах ротора и статора.

Потребляемую мощность можно определить из выражения [50]:

$$N = K_N \cdot \rho \cdot n_0^3 \cdot D^4 \cdot b_n, \quad (1.3.1)$$

где: $K_N = f(\text{Re}_y \Gamma_1 \Gamma_2 \dots)$ – критерий мощности, определяемый из эксперимента; $\text{Re}_y = \rho \cdot n_0 \cdot D^2 / \mu$ – центробежный критерий Рейнольдса; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с; $\Gamma_1, \Gamma_2 \dots$ – симплексы геометрического подобия; ρ – плотность жидкости, кг/м³; n_0 – частота вращения, об/с; D, b_n – диаметр и высота (длина) перемешивающего органа, м.

По методике расчета, разработанной Балабудкиным М.А., мощность определяется без учета влияния расхода для аппарата с прямоугольными прорезями, расчет мощности можно производить по формуле [50]:

$$N = C_1 \text{Re}_y^{-q_3} (\delta / D)^{q_4} [(S_s + S_n) / D]^{q_2} (\Delta / D)^{q_1} [1 + C_2 Q(a_1 z_1 + a_2 z_2) / (V_0 b_n \Delta)] \rho S_y V_0^3. \quad (1.3.2)$$

В работе [52] представлена зависимость критерия мощности от критерия Рейнольдса и геометрических симплексов подобия, выведенная на основании экспериментальных исследований. В работах [53, 54] получены выражения для критерия мощности, учитывающие влияние геометрических и режимных параметров роторного аппарата. В работе [55] расчёт энергопотребления в радиальном зазоре опирается на гидродинамическую модель Куэтта.

В работе [56] уравнение для расчета потребляемой мощности имеет вид:

$$N = 22,5 \cdot 10^6 \cdot Re_M^{-1,17} \left(\frac{\delta}{R_p} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{az_p}{R_p} \right)^{0,7} \cdot \rho h \omega^3 R_p^4, \quad (1.3.3)$$

где, $Re_M = \omega \rho R_p^2 / \mu$.

В работе [57], мощность привода N рассчитывается через энергетический баланс, который состоит из следующих слагаемых:

$$N = N_K + N_\Gamma + N_T + N_a + N_0, \quad (1.3.4)$$

где, $N_K = 0,5 \rho Q V^2$ – мощность, требуемая для сообщения кинематической энергии жидкости, вытекающей из отверстий ротора; $V^2 = V_0^2 + \omega^2 R^2$ – средняя скорость течения жидкости в отверстии ротора; $N_\Gamma = P_3 Q$ – мощность, требуемая для преодоления сопротивления в трубопроводах; P_3 — разность давления жидкости на входе и выходе аппарата; $N_T = \pi \mu H R \frac{\omega^2 R^2}{\delta}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в зазоре между ротором и статором при ламинарном течении жидкости, μ – коэффициент динамической вязкости жидкости; N_a – акустическая мощность, которая в расчетах может не учитываться; $N_0 = (A + B \omega)$ – мощность привода при вращении ротора сухого аппарата (мощность холостого хода); A, B – постоянные величины, зависящие от конструкции аппарата.

В работе [58] на основании уравнения Навье-Стокса определены потери мощности в радиальном зазоре. Для нахождения энергозатрат в аппарате, направленных на преодоление сил сопротивления о внутренний вращающийся

цилиндр, анализируется плоское течение, образованное наложением течения вихревого и течения за счёт источника.

Уравнение для расчета энергозатрат в РИА в условиях автоколебаний может быть записано в виде [58]:

$$N = N_1 + CN_2, \quad (1.3.5)$$

где, C – эмпирический коэффициент; $N_1 = P\omega_1$ – энергозатраты в паре ротор-статор; $P = \tau(S_1 + S_2)$ – сила, действующая на поток жидкости, τ – касательное напряжение, S_1 и S_2 – значение площади поверхностей цилиндров в кольцевом зазоре; $N_2 = \omega^2 R_p^2 Q$ – затраты энергии на перемещение жидкости в прорезях ротора.

В работе [59] предложена методика определения мощности РИА в одной ступени аппарата, учитывающая вязкость жидкости:

$$N = \frac{\pi \mu \omega^2}{2h} (R_o^4 - R_g^4) + N_T, \quad (1.3.6)$$

где N_T – мощность транспортировки жидкости через одну ступень определяется соотношением:

$$N_T = \left(\frac{G}{\rho_{омв} S_{омв}} \right)^3 \frac{\pi \rho (R_o^4 - R_g^4)}{2} \quad (1.3.7)$$

В работах [59 - 61] Червяковым В.М. предложены методики расчета мощности для РИА как с цилиндрическим ротором и статором, так и с коническими ротором и статором. Кинетическая энергия, получаемая потоком жидкости во вращающемся роторе, затем диссипируется в радиальном зазоре между статором и ротором, в осевом зазоре между торцом ротора и корпусом, затем теряется в узлах аппарата.

$$N = N_K + N_{T1} + N_{T2} + N_M, \quad (1.3.8)$$

где N_K – мощность, требуемая для передачи кинетической энергии жидкости, присутствующей во вращающемся роторе; N_{T1} – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в радиальном зазоре; N_{T2} – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в осевом зазоре; N_M – мощность,

необходимая для преодоления сил трения в подшипниках, уплотнениях и т.п. (механические потери в конструкции роторного аппарата).

В работе [62] энергозатраты привода РИА рассматривается как распределение мощности на создание напора, преодоление механических, объемных и гидравлических потерь, а также на преодоление различных сопротивлений в рассматриваемой системе ротор-статор:

$$N = N_{\Gamma} + N_{\mathcal{D}} + N_{\mathcal{H}} + N_{\mathcal{M}} + N_{\mathcal{O}} + N_{\mathcal{Y}}, \quad (1.3.9)$$

где N_{Γ} – гидравлическая мощность, т.е. мощность, передаваемая жидкости в роторе; $N_{\mathcal{D}}$ – диссипируемая мощность, т.е. затраты мощности на трение жидкости в межцилиндровых зазорах – $N_{\mathcal{D}.з.}$ и дисковое трение в зазоре между ротором и корпусом $N_{\mathcal{D}.д.}$; $N_{\mathcal{H}}$ – мощность, расходуемая на деформацию и измельчение твердых частиц, присутствующих в обрабатываемом продукте, которую можно определить за счёт энергетического баланса; $N_{\mathcal{M}}$ – мощность, расходуемая на трение в подшипниках, в уплотнениях вала; $N_{\mathcal{O}}$ – мощность, расходуемая на объемные потери жидкости, связанные с ее возвратом через ротор-статор к входному патрубку, обусловленные тем, что давление на выходе из ротора больше чем на входе. Такие потери можно определить только на основании теоретических изысканий при обработке экспериментальных данных. $N_{\mathcal{Y}}$ – потери мощности связанные с утечками жидкости через уплотнение.

В работах [2, 63] расчёт энергозатрат определен диссипативными потерями в радиальном зазоре на основании сложной структуры потока, используя плоскую модель турбулентного течения.

$$N = k \frac{a_c + a_p}{a_c + b_c} N_1 + k \frac{b_c - a_p}{a_c + b_c} (N_I + N_{II} + N_{III} + N_{IV}); \quad (1.3.10)$$

$$N_1 = \mu (b_c - a_p) \varepsilon h \int_0^{\delta} \left(\frac{\partial V_{\omega R}}{\partial y} \right)^2 dy;$$

$$N_I + N_{III} = \frac{1}{2} \rho Q (V_p^2 + \omega^2 R_p^2 - V_c^2);$$

$$N_{II} = S \cdot \int_0^{\delta} \mu \left(\frac{\partial V_{II}}{\partial y} \right)^2 dy; \quad N_{IV} = S \cdot \int_0^{\delta} \mu \left(\frac{\partial V_{IV}}{\partial y} \right)^2 dy;$$

$$V_{IV} = V_{\omega R} + V_{\Delta P}; \quad V_{II} = V_{\omega R} - V_{\Delta P}.$$

$$V_{\omega R} = \omega \cdot R_p \left(0,5 - 0,383 \cdot \lg \frac{y/\delta}{1 - y/\delta} \right); \quad V_{\Delta P} = \frac{\Delta P}{2\mu l_{cp}} \cdot \delta^2 \left(\frac{y}{\delta} - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right)$$

$$V_p = \frac{Q}{a_p \cdot h}; \quad V_c = \frac{Q}{a_c \cdot h}; \quad Q = \frac{h \cdot \Delta P \cdot \delta^3}{6 \cdot \mu \cdot l_{cp}}; \quad S = \frac{1}{2} (b_c - a_p) \cdot z \cdot h; \quad l_{cp} = (b_c - a_p) / 2;$$

$$V_{\omega R} = 0 \text{ при } y = \delta; \quad V_{\omega R} = \omega R_p \text{ при } y = 0.$$

В работе [64] мощность привода электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$N = N_{\text{вту}} + N_{\text{хх}} + N_{\text{дисс}_{\max}}, \quad (1.3.11)$$

где $N_{\text{вту}}$ – мощность, потребляемая уплотнениями; $N_{\text{хх}}$ – мощность холостого хода, $N_{\text{дисс}_{\max}}$ – мощность диссипации сил трения $N_{\text{дисс}_{\max}} = M_{\text{дисс}} \cdot \omega$ вычисляется по

формуле
$$N_{\text{дисс}_{\max}} = \pi \eta R^3 \omega^2 \left(\frac{2H_p}{\delta_{\min}} + \frac{R}{d_{\min}} \right).$$

В работе [65] получено соотношение, объединяющее основные геометрические параметры аппарата и свойства обрабатываемой среды:

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k \frac{\pi \mu \text{Re}_{zi}}{4h_i} \cdot \frac{\omega^2 (R_D^4 - R_B^4)}{(1 - e^{-\text{Re}_{zi}})} + \sum_{i=1}^k \left[\left(\frac{G}{\rho n_i S_{\text{отв}_i}} \right)^3 \frac{\pi \rho (R_D^2 - R_B^2)}{2} + \left(\frac{\omega^2 G}{2n_i} \sum_{j=1}^{n_i} r_j^2 \right) \right] \quad (1.3.12)$$

где i - число ступеней (зазоров) между неподвижными и вращающимися дисками, $1 \leq i \leq k$; n_i - число отверстий i диска; $S_{\text{отв}_i}$ - площадь отверстия i диска, м²; h_i - величина зазора между дисками i ступени, м; R_D – радиус диска, м; R_B – радиус вала, м; G - массовый расход обрабатываемой смеси, кг/с; $S_{\text{отв}}$ – площадь каждого отверстия диска, м² $\text{Re}_z = \frac{v_z \rho h}{\mu}$ – осевой критерий Рейнольдса. Показано, что затраты мощности возрастают пропорционально квадрату скорости вращения ротора и четвёртой степени диаметра дисков.

Рассмотренные подходы к расчету мощности сложны ввиду большого объема вычислений, достаточно большого числа коэффициентов и многообразия

исходных данных. Для реализации инженерного расчёта параметров РИА с наименьшими затратами времени и достаточной точностью, необходимо разрабатывать методики без сложных математических моделей.

Важной режимной характеристикой РИА является производительность. На основе формулы для расчета расхода жидкости Q через участок трубопровода с перепадом давления ΔP :

$$Q = \nu S = \mu S \sqrt{2\Delta P / \rho}, \quad (1.3.13)$$

в работе [66] были получены аппроксимирующие выражения для среднего коэффициента расхода. Здесь μ - коэффициент расхода, определяемый гидравлическим сопротивлением участка трубопровода с площадью поперечного сечения S .

Расход через аппарат с числом каналов в статоре Z_c определялся в соответствии с выражением [64, 67]

$$Q = Z_c \mu S_c \sqrt{2\Delta P / \rho}, \quad (1.3.14)$$

Расход через аппарат зависит от "коэффициента увлечения", определения которого в работе не дано.

Расход жидкости через аппарат (или через одно отверстие статора) представлен в виде [68]:

$$Q(t) = Q_{\min} + \frac{\omega R}{a} \begin{cases} (Q_{\max} - Q_{\min})t, 0 \leq t \leq \frac{a}{\omega R} \\ (Q_{\max} - Q_{\min})\left(\frac{2a}{\omega R} - t\right), \frac{a}{\omega R} \leq t \leq \frac{2a}{\omega R} \\ 0, \frac{2a}{\omega R} \leq t \leq \frac{(a+b)}{\omega R} \end{cases} \quad (1.3.15)$$

Здесь $Q_{\max}$ и $Q_{\min}$ - значения расхода соответственно при совпадающих и перекрытых каналах, м³/с. Позднее формула (1.3.15) видоизменилась, но смысл ее не менялся.

Зависимость расхода имеет вид по данным публикации [50]:

$$Q(t) = Q_m \left(k - \cos \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (1.3.16)$$

где $k = \bar{Q}/Q_m$; $\bar{Q}$ – среднее значение расхода, м³/с; Q_m – амплитуда изменений расхода, м³/с; T – период колебания, с. Функция $Q(t)$ определяется также типом насоса и несет в себе дискретную составляющую при входе в аппарат.

Модель течения жидкости в каналах ротора и статора РИА была предложена в работах [69 - 72]:

$$V(t) = Q(t)/S(t); \quad (1.3.17)$$

где: $V(t)$ – скорость в прерывателе в момент времени t , м/с; $Q(t)$ – расход жидкости, м³/с; $S(t)$ – площадь проходного сечения, м².

Давление определяется по формуле

$$P(t) = \rho \cdot V^2(t)/2. \quad (1.3.18)$$

Движение потока жидкости в каналах ротора и статора РИА [73] при модуляции потока несжимаемой жидкости в гидродинамической сирене записано в форме уравнения Бернулли:

$$\rho \cdot l \frac{dV}{dt} + \rho \frac{V^2}{2} = \Delta P, \quad (1.3.19)$$

где: $l = l_p + l_c + \delta$; l – длина пути жидкости в прерывателе, м; l_p , l_c – длины каналов ротора и статора, м; δ – зазор между ротором и статором, м; ΔP – перепад давления между полостью ротора и рабочей камерой, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

В работах [66, 74] в уравнение Бернулли (1.3.19) добавлен переменный коэффициент гидравлического сопротивления $\xi(t)$, в работах [66, 74 - 76] – коэффициент гидравлических потерь в зависимости от скорости потока $V(t)$. Авторами работ [66, 74, 76] было предложено воспользоваться методикой расчета и справочными данными для стационарных коэффициентов гидравлических сопротивлений, и ввести член уравнения, учитывающий потери на трение по длине канала $\xi_{mp} = \lambda \cdot l/d$, [81 - 83]. В работах [57, 84, 85] определены основные критерии подобия, характеризующие нестационарные гидромеханические

процессы в аппарате, критерии гомохронности (Ho) и Рейнольдса (Re). В работах [84 – 86] выбирается среднерасходная скорость в качестве масштаба скорости.

С учетом данных поправок, формула (1.3.19) была преобразована к виду [2]:

$$\beta \cdot \rho \cdot l \cdot \frac{dV}{dt} + \lambda \cdot \rho \cdot \frac{l \cdot V^2}{2 \cdot d_s} + \xi(t) \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} + \frac{B(t) \cdot \mu \cdot V}{2 \cdot d_s} = \Delta P \quad (1.3.20)$$

где d_s – эквивалентный гидравлический диаметр, м; β – коэффициент количества движения, определяемый экспериментальным путем [77].

Большой вклад в развитие модели истечения газожидкостной среды через прерыватель РИА сделан в работах Юдаева В.Ф. [57, 66, 68, 82, 84, 85, 87, 95]. Качественно новое развитие теории нестационарных гидромеханических процессов и моделирования течения жидкости через прерыватель РИА осуществлено в работах Зимина А.И. [84– 86, 88, 93].

Уравнение (1.3.19) модернизировано к виду:

$$\left(l + (1 + \Gamma) \sqrt{\frac{S_0}{\pi}} \right) \frac{dV}{dt} + \frac{1}{2} \left(\xi(t) \cdot V^2 + \frac{B \cdot V \cdot \nu}{d_s} \right) = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\omega^2 \cdot R_p^2}{2}, \quad (1.3.21)$$

где: Γ – квадратный корень из отношения площади выходного отверстия канала статора к площади входного отверстия канала ротора; S_0 – площадь поперечного сечения выходного отверстия канала статора, м²; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, Н/м; ω – угловая скорость ротора, с⁻¹; R_p – радиус наружной поверхности ротора, м.

В работах [55, 89] в качестве характеристики расхода жидкости, принята среднемассовая радиальная скорость течения среды.

$$\bar{V}_r = \frac{1}{\Delta \tau} \int_0^{\Delta \tau} V_c(\tau) d\tau, \quad (1.3.22)$$

где $\bar{V}_r$ – среднемассовая радиальная скорость, м/с; V_c – средняя по сечению радиальная скорость, м/с.

В работе [90] предложена методика расчета закономерностей течения жидкости в модуляторе роторного аппарата с применением уравнения неразрывности и дифференциального уравнения относительного движения

жидкости [64]. Конечно-разностный метод расчета течений в плоских каналах с произвольными криволинейными границами описан в [91].

Величину давления в канале статора определяют, исходя из тангенциальной V_1 и радиальной V_2 , составляющих скорости потока,

$$P = \frac{\rho}{2}(V_1^2 + V_2^2) \quad (1.3.23)$$

Тангенциальная составляющая скорости считается постоянной. Радиальная составляющая скорости зависит от расхода и представлена в виде синусоиды.

Формула (1.3.23) лишь качественно отражает действительные процессы по флуктуациям давления в РИА.

В [93] предположено, что давление зависит от расхода (радиальная скорость линейно связана с производительностью, т.е. с расходом) квадратично.

А.И. Сопин [96, 97] предложил рассчитывать переменное давление, генерируемое в аппарате по зависимостям:

$$P(t) \sim Q(t) = \nu S(t). \quad (1.3.24)$$

Для амплитудного значения давления, генерируемого при прерывании потока в аппарате, Юдаевым В.Ф. предложено [87,95] выражение

$$P_A = \frac{\rho R_p^2}{Z_c a^2} \frac{\Omega(Q - Q_T)}{h} \sqrt{\frac{1}{Z_p} \ln \frac{R_p}{R_n}}, \quad (1.3.25)$$

где ρ – плотность обрабатываемой среды; R_p – радиус внешней поверхности ротора; a – ширина канала; Q – полная производительность аппарата; Q_T – транзитный расход; h – высота канала; R_n – радиус цилиндрической полости, образованной вращающейся жидкостью в роторе, не заполненной вследствие центробежного эффекта жидкостью.

Для максимальной амплитуды переменного давления получена формула

$$P_m = k dQ_1(t)/dt \quad (1.3.26)$$

где $Q_1(t)$ – переменный расход через одно отверстие, м³/с; k – некоторая постоянная, зависящая от плотности жидкости и размеров отверстия [2].

Давление, генерируемое потоком из отверстия площадью S , на расстоянии r от него в линейном приближении составляет [95].

$$P(r, t) = \frac{\rho S}{4\pi r} \frac{\partial v(t - r/c)}{\partial t}, \quad (1.3.27)$$

где $v(t)$ - скорость в выходном сечении отверстия.

Из соотношения (1.3.27) следует, что с уменьшением ускорения потока снижается генерируемое давление.

Формула, полученная из соответствующего безразмерного выражения в публикации [67], находится в противоречии с основными законами генерации возмущений давления [98, 99].

$$P_- = \rho l \left| \frac{dv}{dt} \right|_{\max}. \quad (1.3.28)$$

В работе [82] расчет глубины импульса давления выполняется по выражению:

$$P_- = \frac{\rho S_c}{\Omega r} \left| \frac{dv}{dt} \right|_{\max}, \quad (1.3.29)$$

где Ω – телесный угол, в который происходит излучение энергии импульса; r – расстояние от источника генерации (излучения) до точки, где регистрируется давление.

В работах [63, 100] предложен подход по определению изменения давления в канале статора на основе уравнения (1.3.29) для всего периода открытия – перекрытия канала статора аппарата, основанный на уточненном уравнении.

В настоящее время наиболее исследованной и подтвержденной экспериментальными данными является уравнение Бернулли, записанное в виде формул (1.3.20), (1.3.21). На основе этого уравнения можно определить скорость, ускорение, расход, импульсное давление потока жидкости в канале статора РИА.

1.4. Постановка задач исследования процесса экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате.

Анализ литературно-патентных данных показал, что одним из перспективных методов экстрагирования гуминовых кислот является процесс

экстрагирования с применением активных гидродинамических воздействий, который может быть реализован в РИА. Для широкого внедрения в промышленность данных аппаратов необходимо уточнение методик расчета их основных характеристик. Актуальной задачей для различных отраслей промышленности является интенсификация, увеличение производительности и снижение энергозатрат процесса экстрагирования в РИА.

Целью исследований выбирается решение задачи интенсификации процессов экстрагирования гуминовых кислот в РИА и получения жидких гуминовых удобрений на их основе. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ методов расчета, разработка и применение программных продуктов для расчета параметров РИА, влияющих на интенсивность процесса экстрагирования;
- анализ процесса экстрагирования в РИА для интенсификации процесса экстрагирования ГК из гуматосодержащего сырья;
- экспериментальные исследования и уточнение кинетических закономерностей процесса экстрагирования ГК из биогумуса в РИА;
- разработка новых конструкций РИА для интенсификации процесса экстрагирования;
- экспериментальные исследования и разработка технологии экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса и получения жидких гуминовых удобрений.

Глава 2. Интенсификация процесса экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате

2.1. Анализ процесса экстрагирования гуминовых кислот роторном импульсном аппарате

Интенсификация процессов переноса направлена на увеличение одного или нескольких параметров, обозначенных в линейном дифференциальном уравнении [7-12]:

$$dM = K \cdot S \cdot \Delta c \cdot dt, \quad (2.1.1)$$

где Δc – движущая сила процесса; S – единица площади или объема; K – коэффициент скорости технологического процесса; t – время; M – количество перенесенного вещества или энергии.

Для интенсификации процесса экстрагирования, необходимо увеличивать параметры K и Δc путем рационального распределения энергии. Увеличение значений параметров K и Δc требует повышения кинетической энергии для создания больших относительных скоростей движущихся фаз и уменьшения времени обновления межфазной поверхности. Увеличения кинетической энергии потока жидкости можно достичь благодаря увеличению разности скоростных напоров по участкам аппарата и созданию интенсивной турбулентности. Этот способ требует больших энергетических затрат, что в свою очередь повышает энергоемкость оборудования и снижает его к.п.д [101–103].

Иной способ повышения эффективности процесса экстрагирования заключается в увеличении подводимой мощности путем уменьшения времени трансформации энергии в аппарате. При меньшем времени воздействия на жидкую среду в аппарате определенного количества энергии, увеличивается мощность, вкладываемая в объем жидкости, т.е., происходит повышение удельной мощности аппарата. Для интенсификации химико-технологических процессов эффективен ввод энергии в виде короткого, мощного импульса.

Данный метод воздействия на обрабатываемую жидкость реализуется в роторных импульсных аппаратах (РИА).

Процесс экстрагирования в РИА – это совмещенный процесс диспергирования твердой фазы и одновременного извлечения целевого компонента. Концентрированное энергетическое воздействие РИА на обрабатываемую гетерогенную среду происходит в каналах статора и в зазоре между ротором и статором. При проведении процесса экстрагирования в РИА обрабатываемая жидкость может подаваться в замкнутый контур и обрабатываться в циклическом режиме. При транспортировке твердой фазы, жидкостью через аппарат, процесс экстрагирования является прямоточным.

В процессах экстрагирования в системах «твердое – жидкость» при высокоскоростном режиме движения фаз и интенсивном перемешивании относительно друг друга, характерных для РИА, уравнение по расчету коэффициента массоотдачи записывают в виде [7 – 14]

$$\beta = A \cdot \varepsilon^n \cdot Sc^m, \quad (2.1.2)$$

где: $Sc = \mu / (\rho D)$ – критерий Шмидта; μ – динамическая вязкость, Па·с; D – коэффициент диффузии, м²/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; ε – диссипация энергии, Вт/кг; $A = 0,267$, $n = 0,25$, $m = -0,75$ – эмпирические коэффициенты [14].

Ключевое воздействие РИА на обрабатываемую гетерогенную среду происходит в каналах статора и в рабочей камере. Энергия, подводимая к объему суспензии, для РИА рассчитывается как энергия импульса давления, генерируемая в канал статора аппарата [2].

Энергия импульса давления определяется по формуле [2]:

$$E_u = \frac{\rho S_0^2}{2\pi w} \int_0^{t_1} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 dt, \quad (2.1.3)$$

где: S_0 – площадь поперечного сечения канала статора, м²; $V(t)$ – функция изменения скорости жидкости в канале статора, м/с; t – время, с; t_1 – время генерирования импульса давления, $t_1 = (a_c + a_p) / \omega R_p$; w – скорость звука в жидкости м/с; a_c , a_p – ширина прямоугольных каналов статора и ротора соответственно, м;

ω - угловая скорость ротора, с^{-1} ; R_p – радиус внешней поверхности ротора, м; ρ - плотность жидкости, кг/м^3 .

Удельная энергия, диссипируемая в объеме суспензии в канале статора за время его совмещения с каналом ротора, определяется по формуле [2]:

$$\varepsilon_1 = \frac{E_{\text{и}}}{t_2 \cdot v \cdot \rho} = \frac{S_0^2}{2 \cdot \pi \cdot w \cdot t_2 \cdot v} \cdot \int_0^{t_1} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 dt, \quad (2.1.4)$$

где $v = S_0 \cdot \int_0^{t_1} V(t) dt$ – объем жидкости, вошедшей в канал статора при его совмещении с каналом ротора, м^3 ; $t_2 = (a_c + b_c) / (\omega \cdot R_p)$; t_2 – время нахождения объема жидкости в канале статора, с; b_c – расстояние между стенками каналов статора, м.

Сделаем преобразования и запишем выражение для определения удельной энергии в канале статора в виде

$$\varepsilon_1 = \left[S_0 \int_0^{t_1} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 dt \right] / \left[2 \cdot \pi \cdot w \cdot t_2 \cdot \int_0^{t_1} V(t) dt \right]. \quad (2.1.5)$$

Диссипация мощности в зазоре определяется по формуле [2]:

$$\varepsilon_2 = N / (\rho v_1), \quad (2.1.6)$$

где N – затраты мощности на преодоление сил трения в зазоре и увлечение жидкости во вращение, Вт; $v_1 = 2\pi \cdot h \cdot \delta \cdot (R_p + \delta/2)$ - объем зазора между ротором и статором, м^3 .

Рассмотрим РИА радиального типа со щелевыми каналами в роторе и статоре. Ширина каналов в роторе равна ширине каналов в статоре, $a = a_c = a_p$, высота каналов в роторе равна высоте каналов в статоре, $h = h_c = h_p$ число каналов в роторе равно числу каналов в статоре, $z = z_c = z_p$. Для конструкции РИА с принятыми геометрическими параметрами пульсации давления имеют большую амплитуду, чем при других соотношениях геометрических параметров [17].

Формула для определения затрат мощности может быть записана в виде [56]:

$$N = A \cdot \text{Re}_N^{-B} \cdot \left(\frac{\delta}{R_p} \right)^{0.2} \cdot \left(\frac{a \cdot z}{R_p} \right)^{0.7} \cdot \omega^3 \cdot \rho \cdot R_p^4 \cdot h_p, \quad (2.1.7)$$

где $A = k_1 \mu$; $B = k_2 \mu$; h_p – высота ротора, м; $\text{Re}_N = \omega \cdot R_p^2 \cdot \rho / \mu$; k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты, подлежащие определению.

Эмпирические коэффициенты A и B зависят от конструктивного исполнения ротора, вязкости и плотности жидкости.

Удельная энергия в зазоре между ротором и статором зависит, в основном, от радиуса ротора, угловой скорости ротора, ширины и высоты зазора, количества каналов в роторе и статоре, вязкости и плотности жидкости, высоты ротора.

Суммарная удельная энергия жидкости в каналах статора и зазоре между ротором и статором (активных зонах РИА) определяется как сумма удельных энергий в зазоре и каналах статора:

$$\varepsilon = z\varepsilon_1 + \gamma\varepsilon_2, \quad (2.1.8)$$

где γ – коэффициент соотношения транзитного расхода жидкости в зазоре и расхода жидкости в каналах статора и ротора в момент совмещения. Коэффициент γ можно определить при сравнении расхода жидкости для полностью совмещенных каналов ротора и статора и перекрытых каналах ротора и статора при подаче жидкости в аппарат от внешнего насоса. Для РИА коэффициент γ можно принимать в интервале от 0,01 до 0,1.

Рассмотрим влияние основных технологических и геометрических параметров РИА на коэффициент массоотдачи при экстрагировании гуминовой кислоты. К основным параметрам РИА, влияющим на величину энергии импульса давления в канале статора, следует отнести линейную скорость совмещения каналов (ωR_p) и зазор между ротором и статором (δ). Перепад давления между входом в канал ротора и выходом из канала статора, ширина каналов (характерный размер) также имеют определенное влияние, но менее выраженное, чем скорость совмещения и величина зазора. Эффективный коэффициент

диффузии для гуминовых кислот в воду с учетом сопротивления в порах по данным теоретических и экспериментальных исследований [48] составляет в среднем $D=10^{-10}$ м²/с. Для этого диффузионного процесса число Шмидта $Sc=10^4$ для физических свойств воды при 20°C.

На рис. 2.1.1 показаны графики зависимостей диссипации энергии ϵ от параметров ωR_p и δ . На рис. 2.1.2 показан график зависимости коэффициента массоотдачи от диссипации энергии в канале статора.

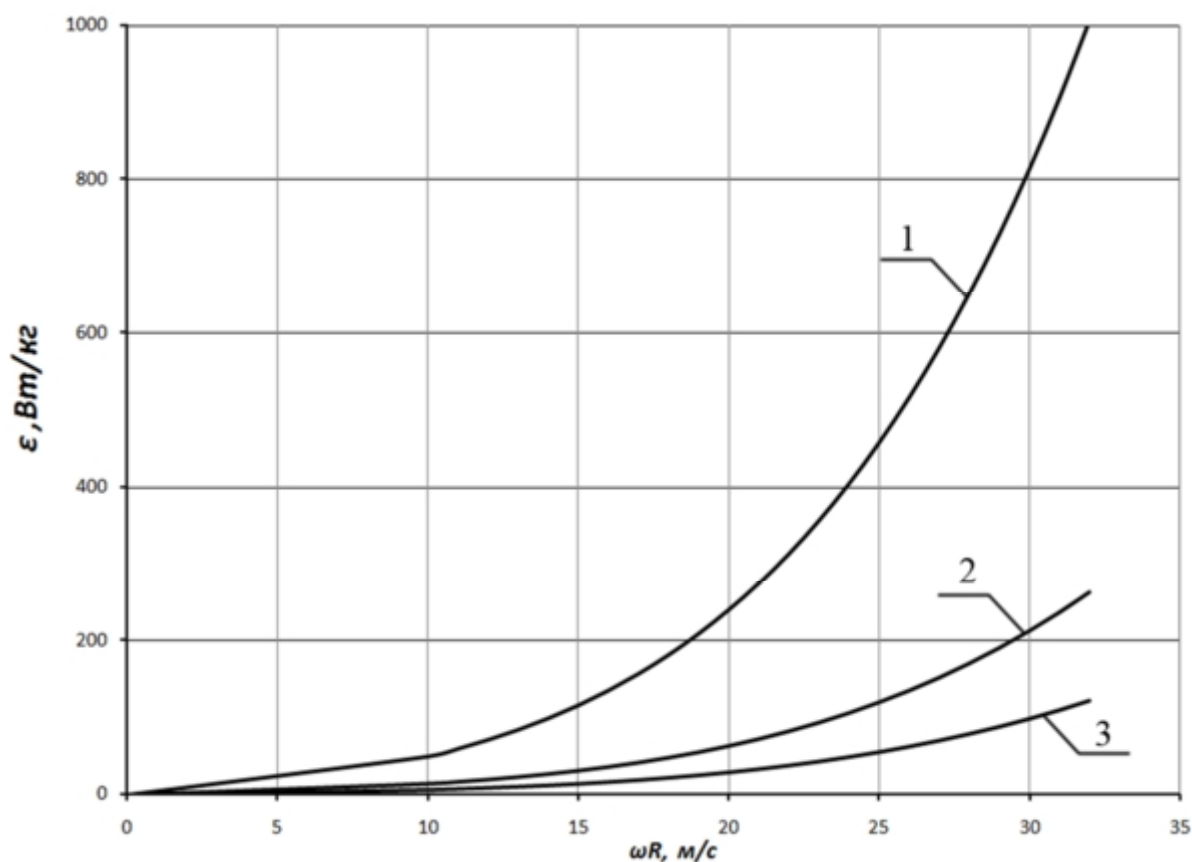


Рис. 2.1.1 Зависимость диссипации энергии от скорости совмещения каналов статора и ротора, при различной величине зазора между ротором и статором: 1 – $\delta = 0,0001$ м; 2 – $\delta = 0,0002$ м; 3 – $\delta = 0,0003$ м.

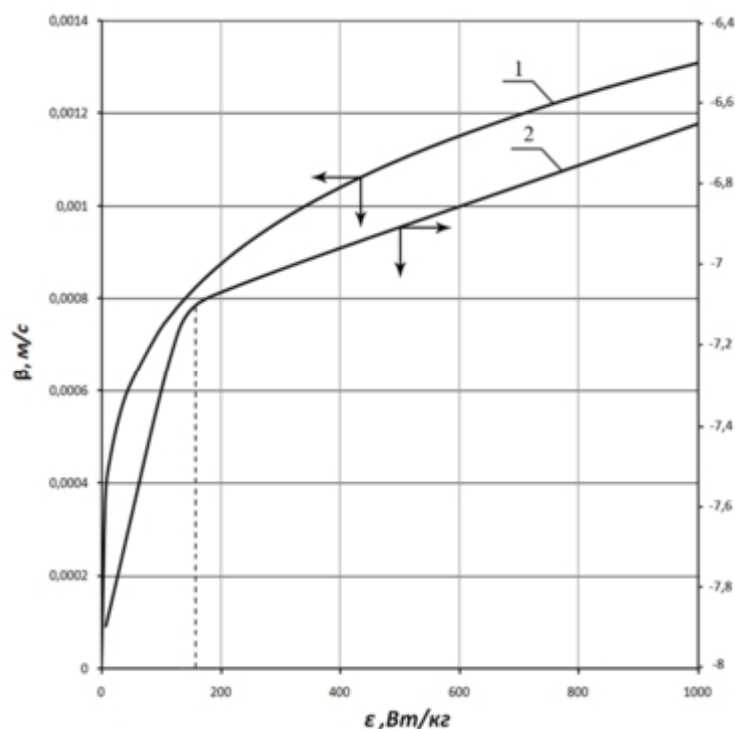


Рис. 2.1.2. Зависимость коэффициента массоотдачи β от удельной энергии ε .

$$1 - \beta = f(\varepsilon); \quad 2 - \ln(\beta) = f(\varepsilon).$$

На основе анализа зависимостей $\varepsilon = f(\omega R_p, \delta, \beta)$ можно сделать вывод, что уменьшение величины зазора между ротором и статором δ и увеличение скорости совмещения канала ротора с каналом статора ωR_p приводит к увеличению величины диссипации энергии ε и, следовательно, к увеличению коэффициента массоотдачи для процесса экстрагирования целевого компонента из твёрдой фазы в жидкость.

Интенсивный рост коэффициента массоотдачи для процесса экстрагирования происходит в интервале значений энергии диссипации $0 < \varepsilon < 150$ Вт/кг, что соответствует интервалу $0 < \omega R_p < 17$ м/с, при $\delta = 0,0001$ м.

В работе [15] предложен метод определения коэффициента массопередачи в жидкой фазе при экстрагировании полисахаридов из растительного сырья импульсным методом. Уравнение массопередачи по жидкой фазе представлено в виде [15, 16]:

$$dM = Ldc = K_c(c_p - c)dSdt, \quad (2.1.9)$$

где K_c – истинный коэффициент массопередачи по жидкой фазе, кг раствора/(с·м²); L – масса раствора, кг; S – площадь поверхности контакта фаз, м²; c_p – предельная концентрация целевого компонента в жидкой фазе, кг/кг раствора; c – концентрация целевого компонента по жидкой фазе, кг/кг раствора.

Произведение $K_c dS$ представлено в виде $K_c dS = K_c \sigma V = K_{cv} V_{ж}$, где σ – удельная поверхность контакта фаз, м²/м³; $V_{ж}$ – объем жидкости, м³.

Коэффициент K_{cv} для i -го концентрационного интервала определяется по формуле[15, 16]:

$$K_{cv_i} = \frac{L(c_{ki} - c_{ni})}{t_i \Delta c_{cpi} \cdot V_{ж}}, \quad (2.1.10)$$

где i – номер рассматриваемого концентрационного интервала; $\Delta c_{ni} = c_p - c_{ni}$; $\Delta c_{ki} = c_p - c_{ki}$; c_p , c_n , c_k – равновесная, начальная и конечная концентрации экстрагируемого вещества в растворе; t_i – время i -го цикла; $\Delta c_{cpi} = (\Delta c_{ni} - \Delta c_{ki}) / \ln(\Delta c_{ni} - \Delta c_{ki})$. В качестве равновесной концентрации c_p принимали предельное значение концентрации гуминовых кислот в жидкости для конкретных условий процесса экстрагирования [15].

Для расчета процесса экстрагирования из твердой фазы в жидкость применяют критериальное уравнение в виде [110].

$$Sh = A \cdot Sc^b \cdot Re^c, \quad (2.1.11)$$

где $Sh = \frac{K \cdot d}{D}$ – число Шервуда; $Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D}$ – критерий Шмидта; $Re = \frac{V \cdot d \cdot \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса, K – коэффициент массопередачи, м/с; D – коэффициент диффузии, м²/с; d – характерный размер, м; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; V – характерная скорость, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; A , b , c – эмпирические коэффициенты.

Запишем модифицированное число Шервуда через коэффициент K_{cv} для жидкой фазы, плотность жидкой фазы ρ , средний размер твердых частиц в суспензии d_{cp} и эффективный коэффициент молекулярной диффузии с учетом сопротивления в порах твердых частиц $D_{эф}$:

$$Sh_v = \frac{K_{cv} \cdot d_{cp}^2}{D_{эф} \cdot \rho}. \quad (2.1.12)$$

Для процесса экстрагирования гуминовых кислот в воду из частиц суспензии биогумуса в роторном импульсном аппарате (РИА) примем $Re = \frac{\omega \cdot R_p \cdot a \cdot \rho}{\mu}$, где a – ширина прямоугольных каналов статора и ротора, м; ω – угловая скорость ротора, c^{-1} ; R_p – радиус внешней поверхности ротора, м; $D_{эф} = 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ – эффективный коэффициент молекулярной диффузии гуминовых кислот в воде с учетом сопротивления в порах [48].

На основе анализа кинетических закономерностей процесса экстрагирования гуминовых кислот в воду из биогумуса при обработке суспензии в РИА уравнение (2.1.11) дополнено безразмерными параметрами (L/G) и (t/t_1) , показывающими соотношение жидкой и твердой фаз и безразмерного времени экстрагирования. Здесь L – масса жидкой фазы, G – масса твердой фазы, t – время экстрагирования, t_1 – время совмещения каналов ротора с каналами статора.

$$Sh_v = A \cdot Sc^b \cdot Re^g \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^c \cdot \left(\frac{t}{t_1}\right)^d, \quad (2.1.13)$$

где c , d , g – эмпирические коэффициенты, подлежащие определению для конкретного сырья, соотношения жидкой и твердой фаз в суспензии, времени процесса экстрагирования.

Для расчета кинетических уравнений процесса экстрагирования в РИА необходим расчет скорости и ускорения потока жидкости в канале статора, определение затрат мощности на вращение ротора аппарата.

2.2. Расчет основных характеристик роторного импульсного аппарата для процесса экстрагирования

Ротор и статор с каналами можно назвать прерывателем потока жидкости в аппарате. На рис. 2.2.1, а. показана изометрическая схема статора – ротора с прямоугольными каналами, а также типичные положения каналов ротора и

статора при вращении [2]. В момент времени $t=0$ (рис. 2.2.1, б) происходит совмещение канала ротора с каналом статора, с минимальной площадью проходного сечения для данного момента времени $S=S_{min}$. В период изменения t от 0 до $t < a_c/(\omega \cdot R_p)$ происходит увеличение площади проходного сечения канала статора и его «открытие». В момент времени $a_c/(\omega \cdot R_p) \leq t \leq a_p/(\omega \cdot R_p)$ канал ротора полностью совмещен с каналом статора, который «открыт», $S=S_{max}$. При дальнейшем перемещении канала ротора, площадь проходного сечения уменьшается, и происходит «закрывание» канала статора в интервале: $a_p/(\omega \cdot R_p) \leq t \leq (a_p + a_c)/(\omega \cdot R_p)$. В момент времени $t = (a_p + a_c)/(\omega \cdot R_p)$ канал статора «закрывается», $S=S_{min}$.

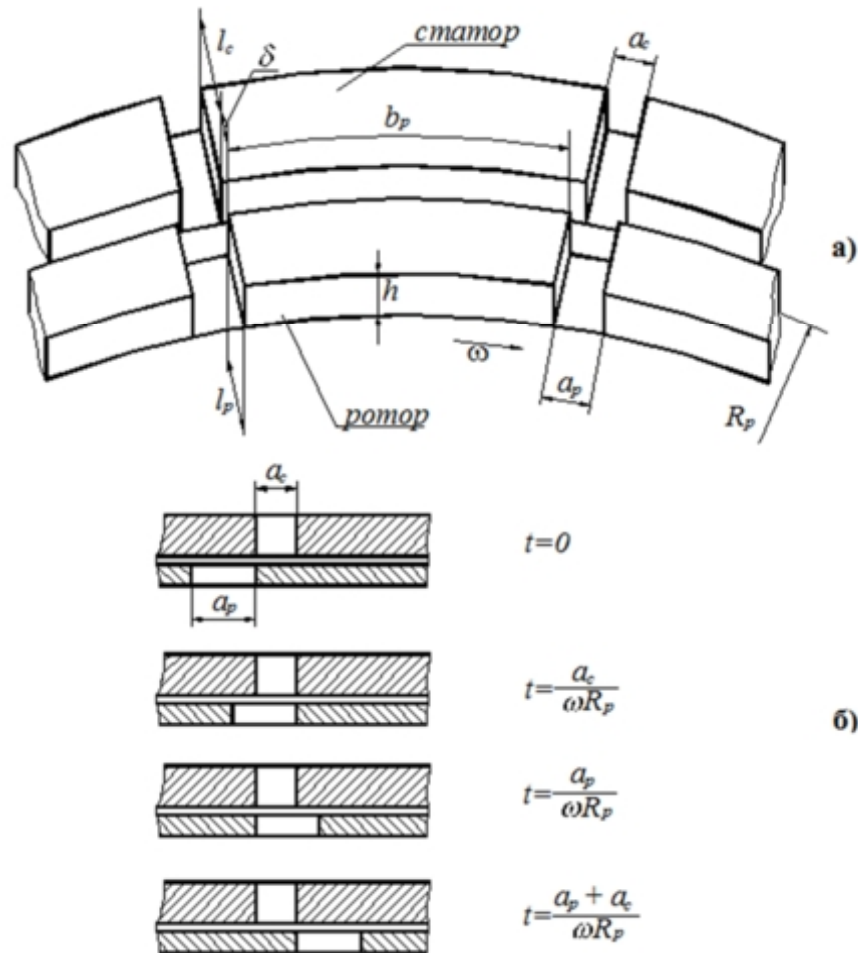


Рис. 2.2.1. Схема ротора и статора с прямоугольными каналами, а также типичные положения каналов ротора относительно статора.

Протяженность временного интервала, в котором канал статора закрыт, ограничивается значениями $(a_p + a_c)/(\omega \cdot R_p) \leq t \leq (b_c + a_c)/(\omega \cdot R_p)$.

Давление внутри канала статора фактически равно давлению в рабочей камере перед открытием канала. В момент открытия канала статора, скорость потока повышается линейно, от начального значения V_{min} до максимального V_{max} , а затем резко падает до V_{min} в момент полного закрытия канала статора. В данный момент времени давление в канале статора повышается, а объем жидкости, вошедший в канал статора, за счет инерционных сил движется вперед. После импульса избыточного давления возникает кратковременное понижение давления, а затем его повышение.

В полости ротора и в канале ротора пульсации давления и скорости потока также распространяются, но их амплитуда мала в соотношении с пульсациями в канале статора. Это связано с тем, что в канал ротора и полость ротора жидкость поступает под давлением и кратковременный импульс увеличения скорости мгновенно гасится за счет высокого напора жидкости, который создается центробежным давлением, либо внешним источником давления, или и тем и другим [2].

Основными характеристиками технологического оборудования служат производительность, потребляемая мощность и параметр, определяющий эффективность работы оборудования.

Производительностью для РИА можно считать расход обрабатываемой жидкости через аппарат. Расход через РИА зависит от внешнего статического давления, создаваемого насосом и от собственного насосного эффекта, возникающего при вращении ротора. Внешний насос, нагнетающий жидкость под давлением в РИА, позволяет увеличить производительность аппарата. Внешний насос подбирается под заданное значение расхода и давление, которое он должен создать в полости ротора. Давление в полости ротора является расчетным режимным параметром.

Затраты мощности на вращение ротора и создание потока жидкости с требуемыми гидродинамическими характеристиками зависят от многих параметров как аппарата, так и обрабатываемой жидкости. Параметры жидкости задаются изначально, и изменить их, как правило, не представляется возможным.

При расчете мощности на вращение ротора можно изменять только конструктивные, геометрические и режимные параметры РИА. Методики расчета параметров РИА рассматривались в [2, 17, 49, 57, 58, 59, 60, 61, 72, 79, 88, 92, 93, 104, 105, 106, 107].

Параметром, определяющим эффективность интенсивность процесса экстрагирования для РИА, в общем случае, является амплитуда ускорения потока жидкости в канале статора. От амплитуды ускорения зависит импульсное давление и степень развитости кавитации в канале статоре, которые оказывают основное интенсифицирующее действие на химико-технологические процессы, в том числе интенсивность процесса экстрагирования.

В геометрические параметры РИА входят: δ – зазор между ротором и статором, м; R_p – радиус внешней поверхности ротора, м; $l_{p,c}$ – длины каналов ротора и статора, м; h – высота канала статора, м; $a_{p,c}$ – ширина прямоугольного канала ротора и статора, м; b_p – расстояние между ближайшими точками боковых стенок соседних каналов ротора на радиусе R_p , м; b_c – расстояние между боковыми стенками соседних каналов статора, находящихся на радиусе $R_p + \delta$, м; h_p – высота прямоугольного канала ротора, м; h_k – высота рабочей камеры, м; z_p – число каналов ротора; z_c – число каналов статора.

Технологические параметры РИА: Q – расход обрабатываемой жидкости через аппарат, м³/с; ΔP – общий перепад давления между полостью ротора и камерой статора, Па; P_{cm} – статическое давление в полости ротора, Па; P_u – центробежное давление, Па; P_c – давление на выходе из канала статора, Па; ω – угловая скорость ротора, с⁻¹; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; N – мощность, потребляемая на вращение ротора, Вт.

При расчете и проектировании РИА необходимо стремиться минимизировать потребляемую мощность, увеличить значение амплитуды ускорения потока жидкости и получить расход жидкости через аппарат не менее заданной величины. Для этого необходимо рассчитывать не только

характеристики и параметры РИА, но и подбирать насос с определенными характеристиками по давлению P_{cm} и расходу Q .

Импульсное давление определяется по известной формуле [88, 93]:

$$P_u(t) = \rho \frac{dV}{dt} \left[\frac{S_0}{2\pi} \right]^{0.5}, \quad S_0 = a_c \cdot h_c. \quad (2.2.9)$$

Для расчета скорости и ускорения потока жидкости возможно использовать систему уравнений Навье-Стокса и уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости. А для двухмерного случая, дифференциальную систему уравнений Навье-Стокса с уравнением неразрывности можно записать в виде [88]:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right); \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right); \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (2.2.10)$$

Здесь V_x , V_y – проекции скорости на оси координат x и y .

Сложность гидромеханических процессов не позволяет использовать уравнения Навье–Стокса для нахождения кинематических и динамических характеристик потока жидкости ($V_x=V_x(x, y, t)$, $V_y=V_y(x, y, t)$, $P=P(x, y, t)$), в связи с тем, что описание нестационарных гидромеханических процессов в РИА связано с использованием нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с переменными начальными и граничными условиями, многие из которых обычно неизвестны. Особенно сложно рассчитать данную систему уравнений из-за того, что одна из границ подвижна. Для описания законов движения потока рабочей среды с достаточной точностью, необходимо применение более простых моделей течения жидкости.

Математическая модель, базирующаяся на нестационарном уравнении Бернулли, достаточно полно отображает определяющие закономерности гидромеханических процессов в канале статора РИА [2, 72, 88, 93, 106]:

$$\beta \cdot l \cdot \frac{dV}{dt} + \lambda(t) \cdot \frac{l \cdot V^2}{2 \cdot d_g} + \xi(t) \cdot \frac{V^2}{2} + \frac{B(t) \cdot v \cdot V}{2 \cdot d_g} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{\rho}, \quad (2.2.11)$$

где: β – коэффициент количества движения потока жидкости через прерыватель, для инженерных расчетов его принимают равным единице; $l = l_c + \delta + l_p$ – длина «прерывателя» потока жидкости, м; δ – зазор между статором и ротором, м; $V(t)$ – средняя по сечению канала статора скорость потока жидкости, м/с; $\lambda(t)$ – коэффициент гидравлического сопротивления трения; d_s – эквивалентный диаметр канала статора, м; l_c – длина канала статора, м; l_p – длина канала ротора, м; $\xi(t)$ – суммарный коэффициент местного гидравлического сопротивления; $B(t)$ – коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий потери напора, линейно зависящие от скорости потока; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м/с²; ΔP_Σ – общий перепад давления между полостью ротора и камерой статора, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

На основе уравнения Бернулли, записанном в нестационарной форме, можно определить скорость потока жидкости $V(t)$, ускорение dV/dt , расход среды $Q(t)$, а также амплитуду импульса давления $P_u(t)$.

Способы решения уравнения (2.2.11) представлены в литературе [2, 88, 93].

На основе уравнения Бернулли (2.2.11) можно рассчитать показатели динамических и кинематических характеристик потока жидкости. Усредненная скорость потока жидкости за период совмещения канала ротора с каналом статора определяется по формуле [2, 88, 93]:

$$V = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} V(t) dt \quad (2.2.12)$$

Перепад давления между входным каналом ротора и выходным каналом статора:

$$\Delta P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P(t) dt \quad ; \quad (2.2.13)$$

Объем жидкости, вошедший в канал статора за период совмещения канала ротора с каналом статора определяется по формуле:

$$v = S \int_0^{t_1} V(t) dt \quad (2.2.14)$$

В общий перепад давления между камерой статора и полостью ротора (ΔP_Σ) входит статическое давление (P_{cm}), создаваемое насосом, который под давлением нагнетает жидкость в полость ротора, а также давление, создаваемое вращательным движением ротора. Принято, что в полости ротора жидкость вращается со скоростью, равной скорости вращения ротора. В данном случае длина l_p почти не влияет на расчет расхода с поправочной функцией $f(\omega, R_p, \mu)$.

Центробежное давление за счет разгона жидкости будет иметь следующий вид [2]:

$$P_{ц} = \rho \cdot \omega^2 \cdot R_p^2 \quad (2.2.15)$$

Суммарный перепад давления между входом в канал ротора и выходом из канала статора записывается по формуле [2]:

$$\Delta P_\Sigma = P_{ст} + \rho \cdot \omega^2 R_p^2 - P_c \quad (2.2.16)$$

Для инженерного расчета давление на выходе из канала статора P_c можно принять равным нулю, $P_c = 0$. Это условие, как правило, выполняется для РИА, имеющего выходной патрубок равный по площади проходного сечения площади проходного сечения входному патрубку и открытую гидравлическую систему на выходе.

2.3. Расчет роторного импульсного аппарата с применением информационных технологий

Составим блок-схему основного алгоритма программы для расчета характеристик и параметров РИА. (рис 2.3.1) на основании вышеописанных уравнений и зависимостей.

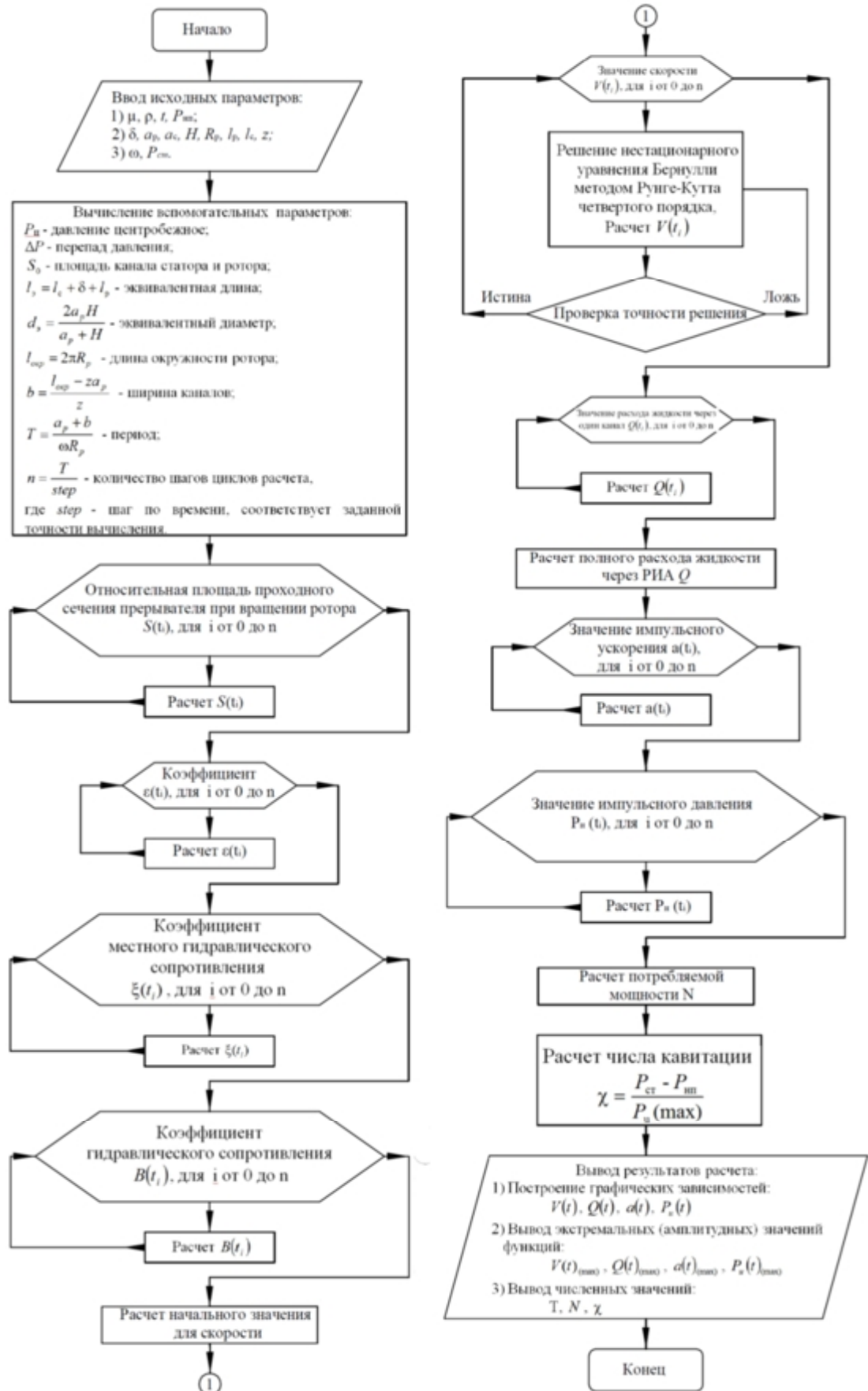


Рис. 2.3.1. Блок-схема алгоритма программы для расчета характеристик РИА.

Алгоритм расчета параметров РИА реализован в программном продукте «Расчет основных параметров РИА радиального типа». Данный программный продукт создан на базе приложения Microsoft Visual Basic 6.0 [108]. Интерфейс программы представлен на рис. 2.3.2.

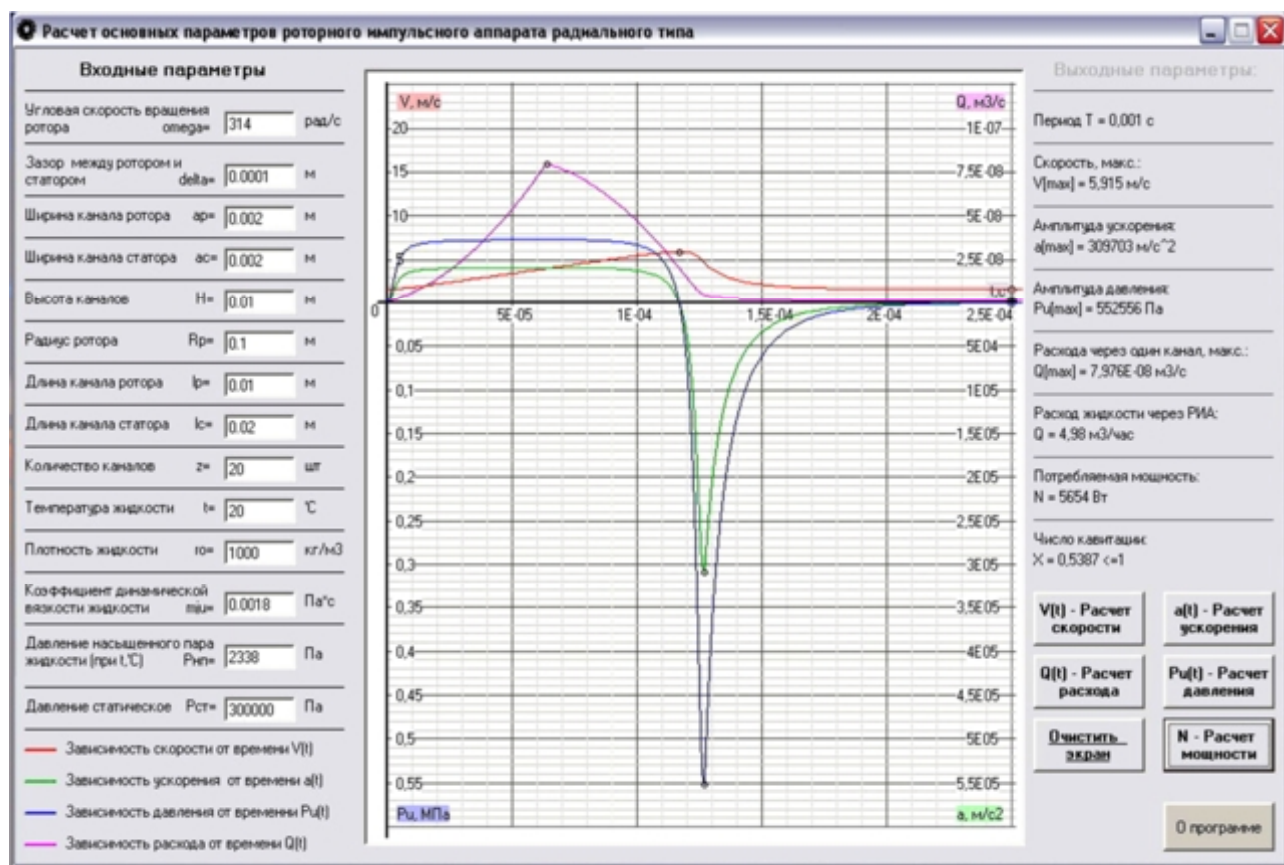


Рис.2.3.2. Интерфейс программы расчета основных параметров РИА.

В левой части окна находится:

- список входных параметров и их обозначение;
- текстовые окна для ввода численных значений параметров;
- единицы измерения параметров (СИ).

При наведении курсора на название вводимого параметра выводится подсказка о диапазоне допустимых значений параметра (рис 2.3.3).

Входные параметры

Угловая скорость вращения ротора $\omega =$ рад/с

Зазор статора м

Ширина канала ротора $a_r =$ м

Ширина канала статора $a_c =$ м

Рис.2.3.3. Ввод численных значений параметров.

В левом нижнем углу основного окна программы приведена легенда графического окна. Указаны соответствия между цветом линий графика и рассчитываемыми характеристиками.

В центральной части окна приведена система координат для построения графиков зависимостей. В данной системе координат ось абсцисс – это шкала времени с ценой деления $1 \cdot 10^{-5}$ с, а по оси ординат расположены 4 шкалы:

- 1) в левом верхнем углу – шкала скорости, с ценой деления 1 м/с;
- 2) в правом верхнем углу – шкала расхода с ценой деления $5 \cdot 10^{-9}$ м³/с;
- 3) в правом нижнем углу – шкала ускорения с ценой деления $1 \cdot 10^4$ м/с²;
- 4) в левом нижнем углу – шкала давления с ценой деления 0,01 МПа.

В результате решения уравнения с указанными входными параметрами в различных системах координат отображаются отдельные графические зависимости расхода, давления, скорости и ускорения. Точкам на графиках, соответствуют экстремумы функций. В данных точках значения графиков функций показываются числовыми параметрами в соответствующих текстовых окнах в правой части главного окна программы (рис.2.3.4).



Рис.2.3.4. Вывод численных значений результатов расчета.

В правом верхнем углу главного окна программы отображаются численные значения рассчитанных характеристик и параметров: амплитудные значения скорости, ускорения, расхода, давления; период перекрытия канала; полный расход через РИА; потребляемая мощность; число кавитации.

На основе данных по давлению в потоке жидкости можно определить число импульсной кавитации по формуле [2, 13, 68]:

$$\chi = \frac{P_c - P_{\text{нп}}}{P_u(\text{max})}, \quad (2.3.1)$$

где P_c - давление в канале статора, Па; $P_{\text{нп}}$ - давление насыщенных паров обрабатываемой жидкости, Па.

Число импульсной кавитации показывает степень развитости кавитационных явлений в канале статора аппарата. При $\chi \leq 1$ кавитация считается развитой. Чем меньше χ , тем интенсивнее кавитация.

Кнопки управления расположены справа в нижнем углу (рис. 2.4.5).



Рис 2.3.5 Кнопки управления.

Кнопки « $V(t)$ Расчет скорости», « $a(t)$ Расчет ускорения», « $Q(t)$ Расчет расхода», « $P_u(t)$ Расчет давления» используются для запуска расчета соответствующих зависимостей, вывода графиков на систему координат, а также отображения численных значений в отдельном окне.

Эти кнопки так же обновляют данные при изменении исходных параметров. В программе существует возможность по одновременному выводу на экран нескольких графиков при различных входных параметрах одной и той же зависимости.

Кнопка « N Расчет мощности» запускает расчет потребляемой мощности и выводит результат в отдельное текстовое окно.

Клавиша «Очистить экран» удаляет графические зависимости из окна системы координат [108].

Для решения системы уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности (2.2.10) применяли программный комплекс PDE Solutions Inc. FlexPDE.

FlexPDE – программный продукт, предназначенный для построения сценариев по решению моделей дифференциальных уравнений, с использованием метода конечных элементов. По разработанному нами сценарию, программа FlexPDE выполняет операции преобразования системы уравнений (2.2.10) в модель для расчета с использованием метода конечных элементов, находит решение для этой системы и представляет результаты в графической форме.

Подробное описание программного продукта FlexPDE приведено в Приложении 1.

Для построения модели течения жидкости в каналах РИА использовалась двухмерная система координат. Геометрические параметры модели каналов ротора и статора представлены на рис. 2.3.7. Примерный вид готовой сетки конечных элементов показан на рис 2.3.6.

В данной модели принято допущение о нулевом зазоре между ротором и статором, $\delta=0$. Сценарий расчета потоков жидкости в каналах для FlexPDE приведен в Приложении 2.

На рис. 2.3.7 геометрия очерченная точками 1,2,3,7,8 – канал ротора, геометрия очерченная точками 6,7,3,4,5 – канал статора, стрелки указывают направление течения жидкости, l_p – длина канала ротора, l_c – длина канала статора, a_p – ширина каналов ротора; a_c – ширина каналов статора; Δ_y – смещение каналов.

Задача решалась при следующих граничных условиях:

$p = P_p + P_{\text{ц}}$ – на входе жидкости в канал ротора – участок 1-8; $p = P_c$ – на выходе из канала статора – участок 4–5; $V_x = 0$, $V_y = 0$ – на поверхностях каналов ротора и статора – остальные участки.

Схема входных, выходных параметров системы показана на рис. 2.3.8. Входными параметрами данной модели являются: ρ – плотность при расчетной температуре, кг/м^3 ; μ – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$; P_p – статическое давление в полости ротора, Па ; $P_{\text{ц}}$ – центробежное давление, Па ; P_c – давление на выходе из канала статора, Па ; l_p – длина ротора; l_c – длина статора; a_p – ширина ротора; a_c – ширина статора.

Результаты расчета гидродинамических параметров в каналах РИА приведены на рис. 2.3.9 – рис. 2.3.17. Геометрические параметры модели соответствовали размерам каналов РИА: $l_p = 0,01$ м ; $l_c = 0,02$ м ; $a_p = 0,002$ м; $a_c = 0,002$ м. Значения давлений на входе (участок 1-8): $P = 0,4$ МПа; на выходе (участок 4-5): $P = 0,04$ МПа; в качестве параметров жидкости использовались физические свойства воды при 20 °С. На рис. 2.3.9 – рис. 2.3.11 представлены поля скоростей при различной степени перекрытия каналов.

Графики рис. 2.15 иллюстрируют распределение скорости по сечению, соответствующему точкам 2, 3, 7, 6 (см. рис. 2.3.7). Для полей скоростей вязкой жидкости характерно снижение скорости («прилипание») в пристеночном слое, о чем и свидетельствует параболический характер графиков скорости.

Объемные графики рис 2.3.12 – рис. 2.3.14 повторяют соответствующие графики рис. 2.3.9 – рис. 2.3.11, численное значение скорости жидкости в данной точке откладывается по оси аппликат в двумерной декартовой системе координат. На рис. 2.3.15 – рис. 2.3.17 представлены поля давлений жидкости в каналах РИА при различных положениях канала ротора относительно каналов статора.

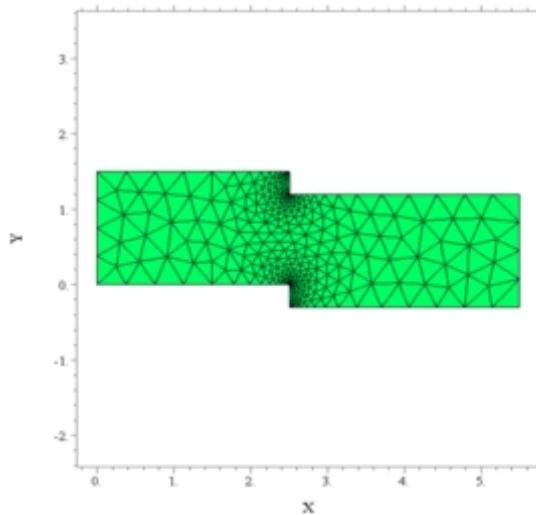


Рис.2.3.6. Сетка конечных элементов.

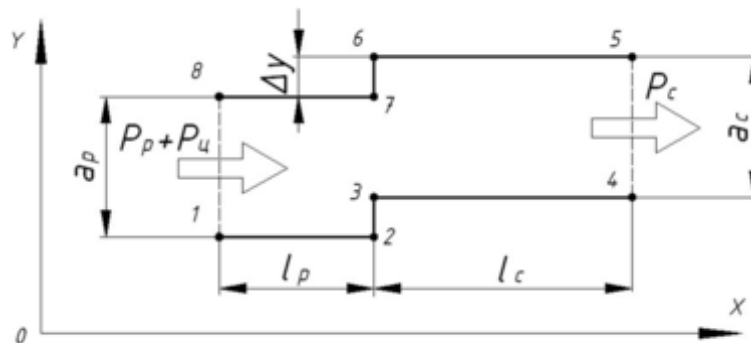


Рис.2.3.7. Геометрические параметры каналов ротора и статора.

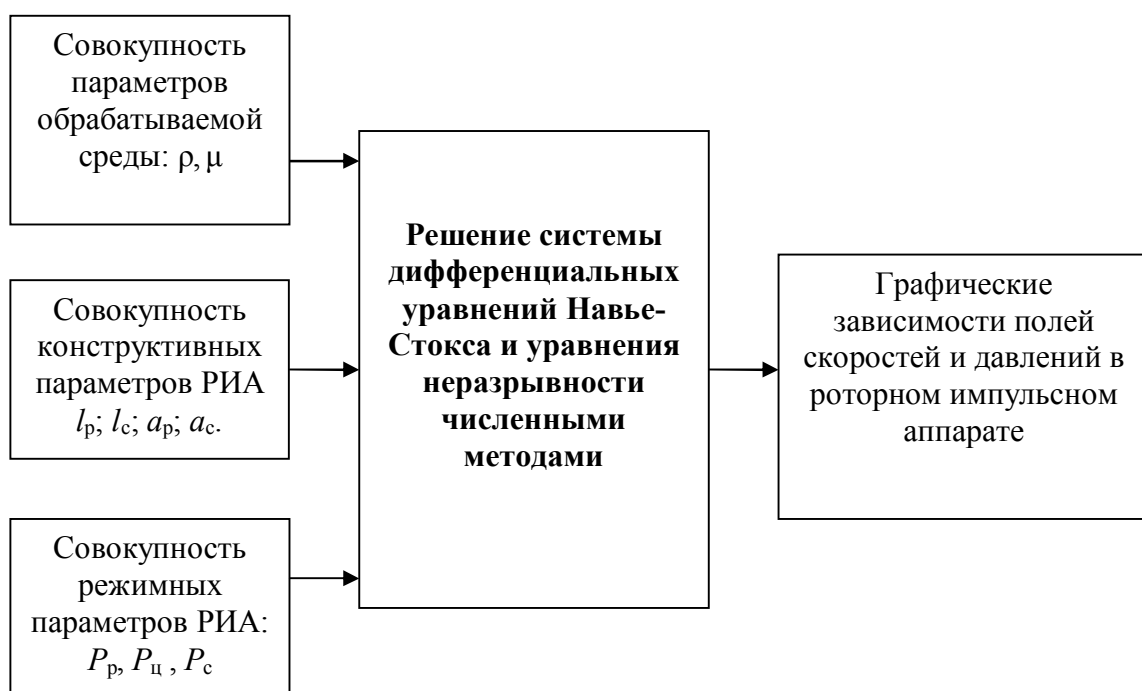


Рис.2.3.8. Схема входных, выходных параметров системы.

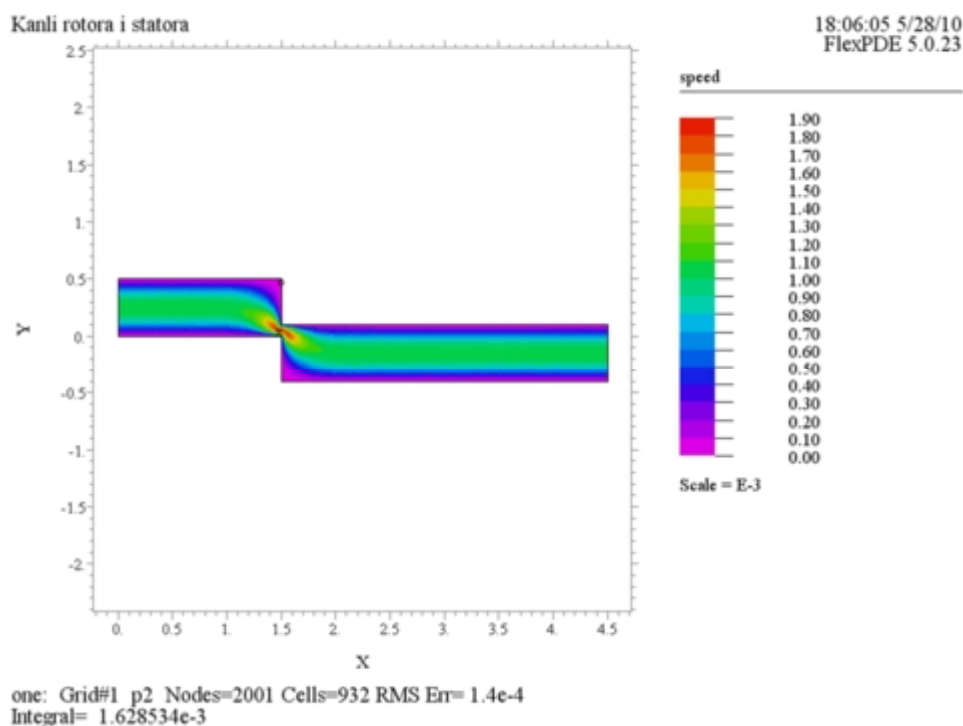


Рис.2.3.9. Поле скоростей жидкости в каналах РИА при различных положениях каналов ротора относительно каналов статора. Совмещенные на 20% каналы.

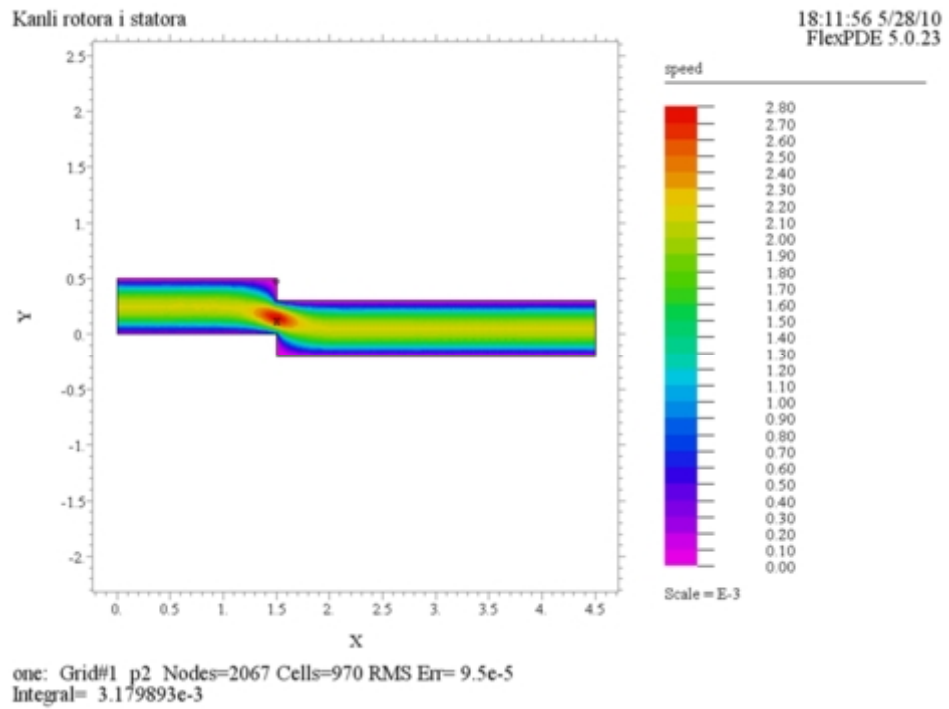


Рис.2.3.10. Поле скоростей жидкости в каналах РИА при различных положениях каналов ротора относительно каналов статора. Совмещенные на 50% каналы.

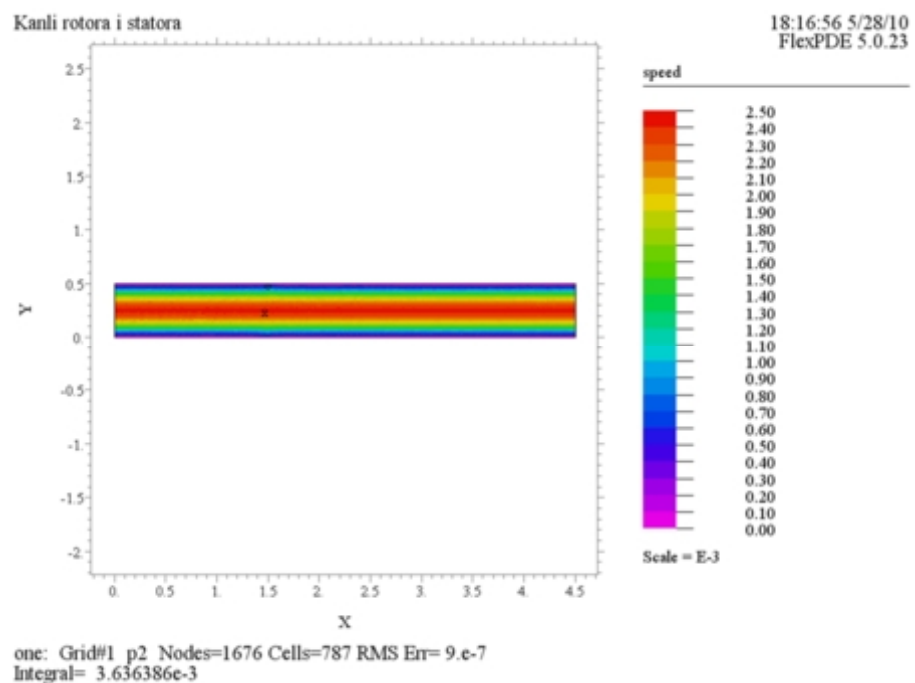


Рис.2.3.11. Поле скоростей в полностью совмещенных каналах ротора и статора.

18:06:05 5/28/10
FlexPDE 5.0.23

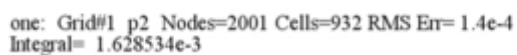


График соответствует схеме на рис. 2.3.9.



18:11:56 5/28/10
FlexPDE 5.0.23

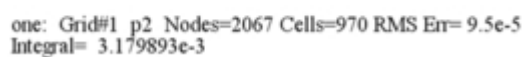


График соответствует схеме на рис. 2.3.10.

Kanli rotora i statora

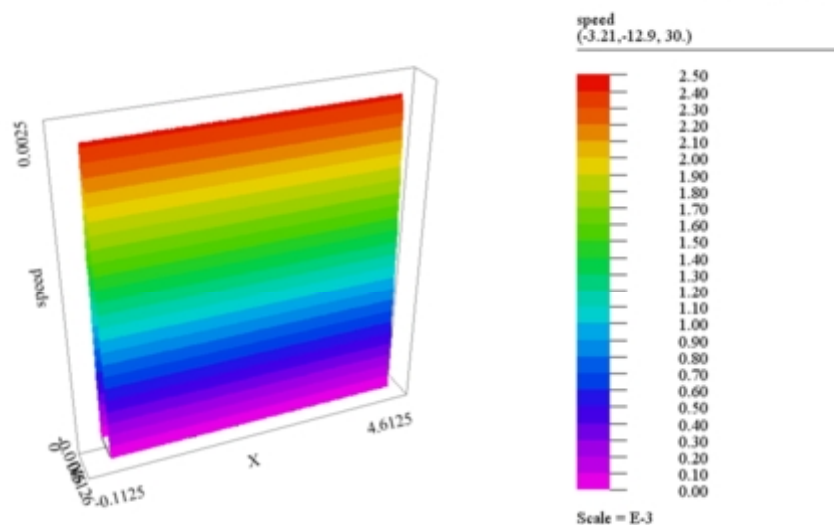
18:16:56 5/28/10
FlexPDE 5.0.23one: Grid#1 p2 Nodes=1676 Cells=787 RMS Err= 9.e-7
Integral= 3.636386e-3

Рис.2.3.14. Объемный график скорости жидкости в каналах.

График соответствует схеме на рис. 2.3.11.

Kanli rotora i statora

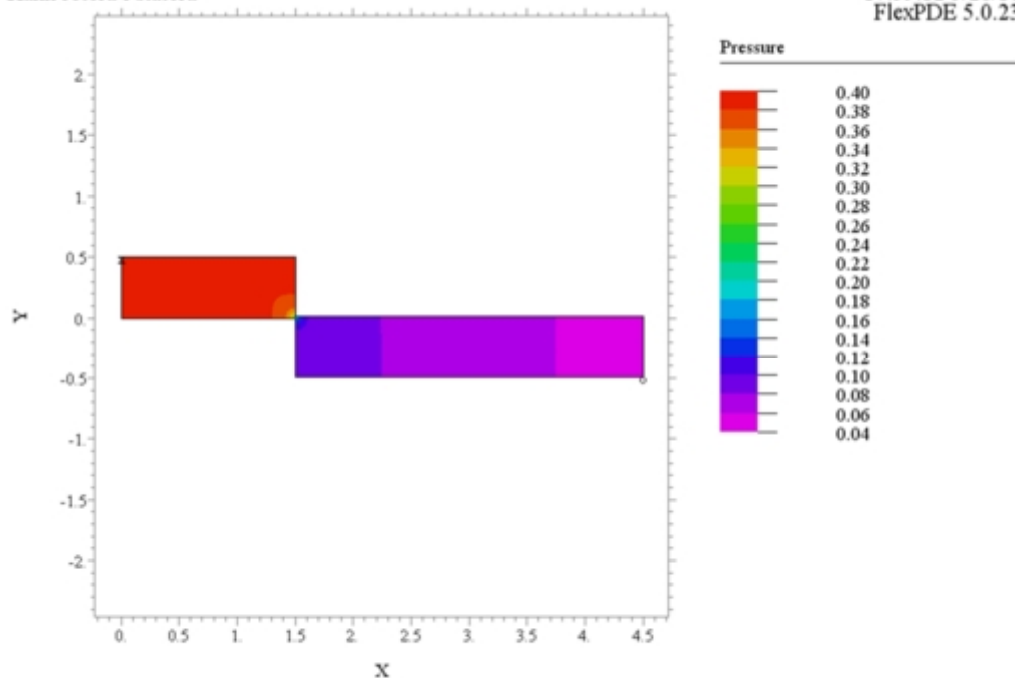
17:59:12 5/28/10
FlexPDE 5.0.23one: Grid#1 p2 Nodes=1495 Cells=678 RMS Err= 7.2e-5
Integral= 0.397464

Рис.2.3.15. Поле давлений в каналах РИА.

График соответствует положению ротора на рис. 2.3.9.

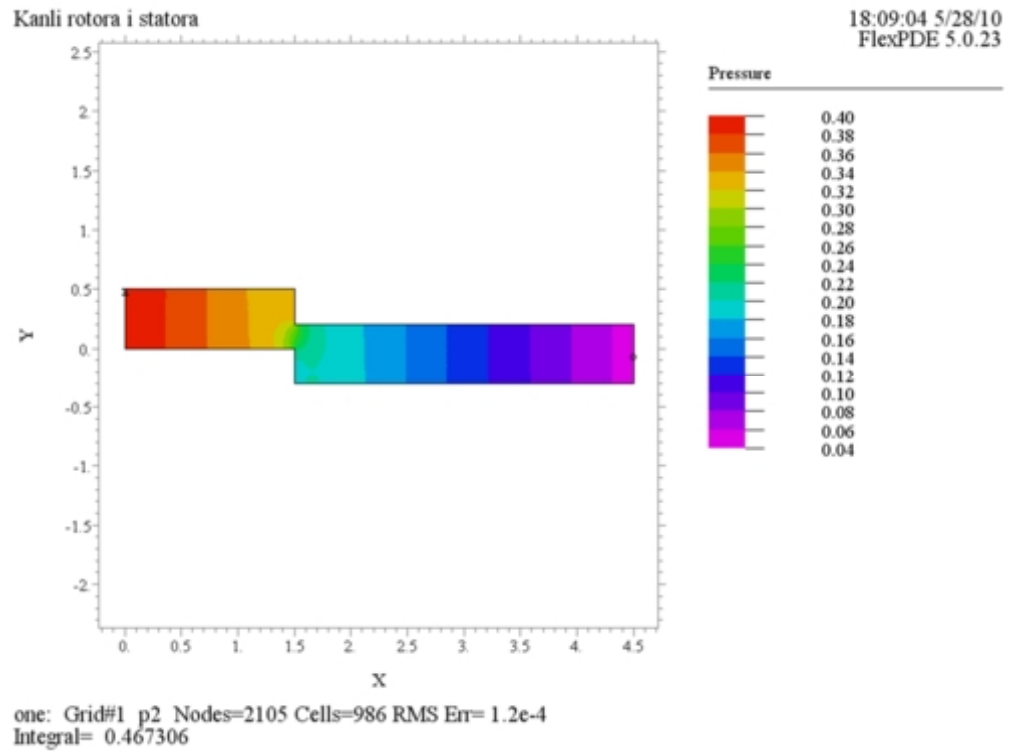


Рис.2.3.16. Поле давлений в каналах РИА.

График соответствует положению ротора на рис. 2.3.10.

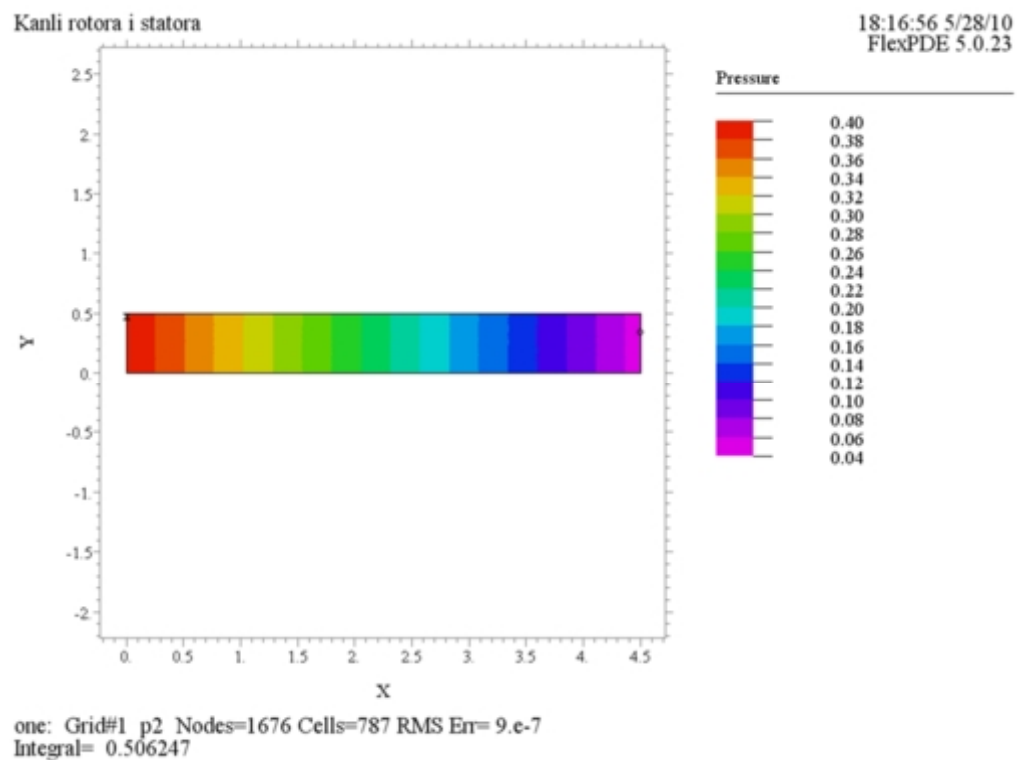


Рис.2.3.17. Поле давлений в каналах РИА при совмещенных каналах.

На рис. 2.3.18 пояснены геометрические параметры расчетной модели ротора и статора. Сценарий расчета потоков жидкости в каналах для FlexPDE приведен в Приложении 3.

Копия свидетельства о регистрации программы для ЭВМ № 2010612236 на сценарий расчета потоков жидкости в канале под названием «Программа расчета полей скоростей и давлений потоков жидкости в каналах РИА» приведена в Приложении 4.

Задача решалась при следующих граничных условиях:

$p = P_p + P_c$ – давление на входе жидкости в каналы ротора – (заштрихованные стрелки); $p = P_c$ – давление на выходе из канала статора – (светлые стрелки); $V_x = 0$, $V_y = 0$ – скорость в зазоре между ротором и статором и на поверхностях каналов ротора и статора (границы участков показаны на рис. 2.3.18 утолщенной линией).

Входными параметрами данной модели являются:

На рис. 2.3.19 – 2.3.26 показаны примеры результатов расчета гидродинамических параметров РИА.

Геометрические параметры модели соответствуют экспериментальному образцу РИА со следующими размерами: $l_p = 0,01$ м ; $l_c = 0,01$ м ; $a_p = 0,005$ м; $a_c = 0,005$ м, $d = 0,001$ м. Значения давлений на входе (заштрихованные стрелки на рис. 2.22): $P = 0,4$ МПа; на выходе (светлые стрелки на рис. 2.3.18): $P = 0,04$ МПа; в качестве параметров жидкости использовались физические свойства воды при 20 °С.

На рис. 2.3.19– рис. 2.3.22– представлены поля скоростей в каналах РИА при различной степени совмещения. На рис. 2.3.23 – рис. 2.3.26 – представлены поля давлений в каналах РИА при различной степени совмещения каналов ротора и статора РИА.

При анализе графиков полей давлений (рис. 2.3.23 – рис. 2.3.26) можно сделать следующие выводы:

- при закрытых каналах (рис. 2.3.26) давление в каналах ротора возрастает, незначительный «сброс» давления происходит в полость зазора между ротором и статором;

- при открывании каналов (рис. 2.3.25, рис. 2.3.24) происходит резкий выброс импульса давления в каналы статора.

Полученные графики полей скоростей и давлений позволяют определять численные значения скорости и давления в полости каналов ротора и статора.

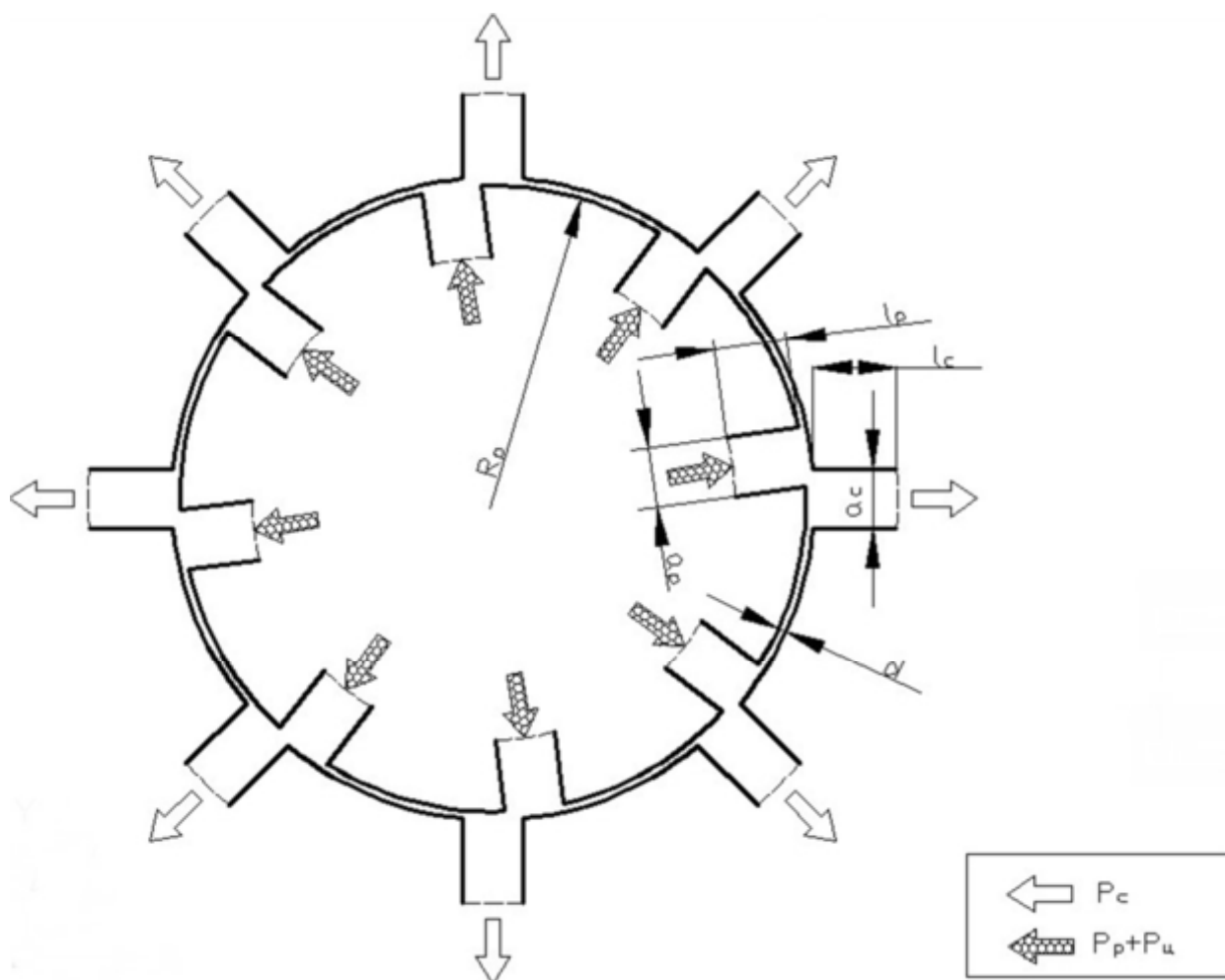


Рис.2.3.18. Геометрические параметры каналов ротора и статора.

l_p – длина канала ротора, l_c – длина канала статора, a_p – ширина каналов ротора; a_c – ширина каналов статора; δ – зазор между ротором и статором, R_p – радиус ротора.

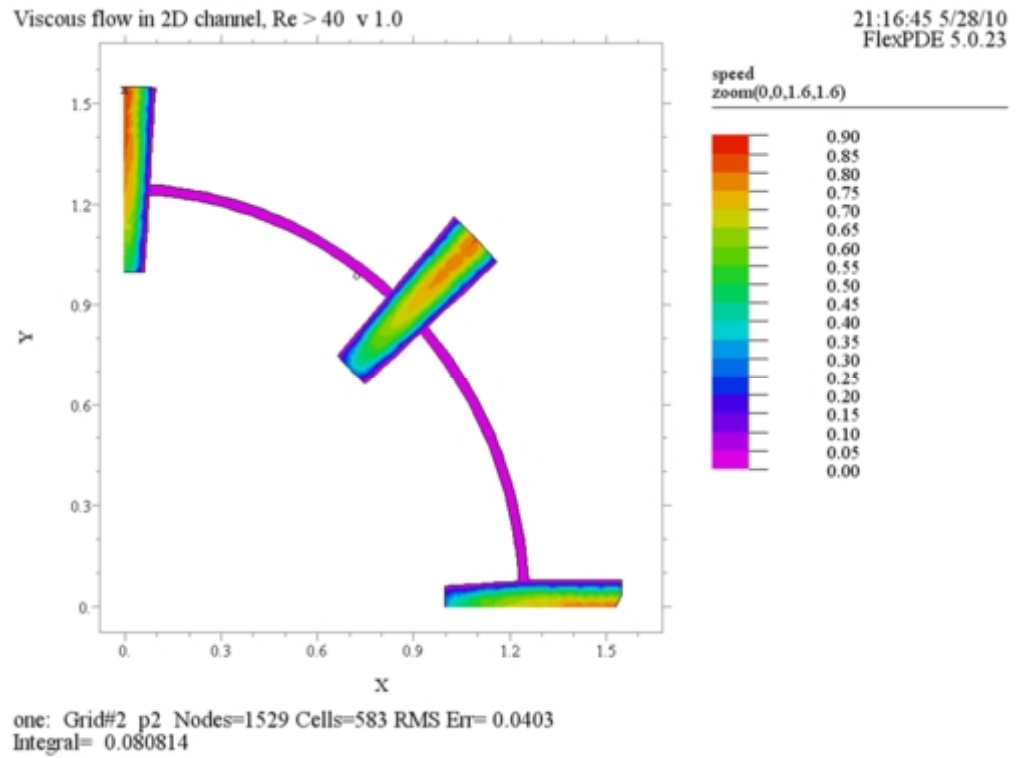


Рис. 2.3.19. Поля скоростей при полностью совмещенных каналах.

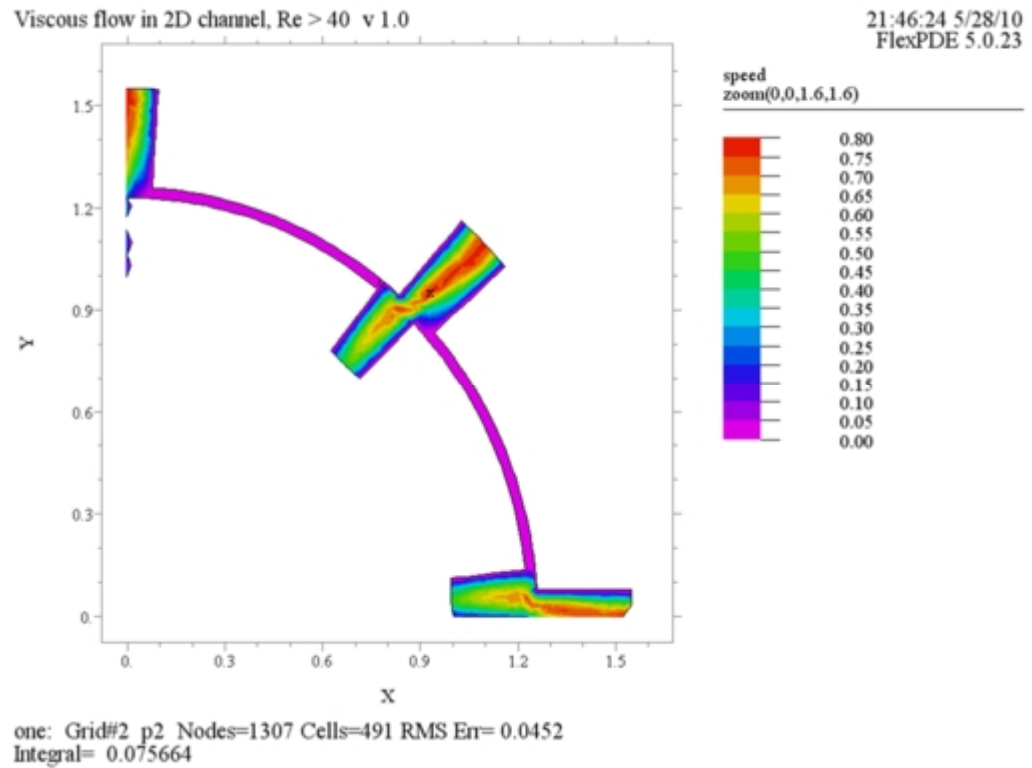


Рис. 2.3.20. Поля скоростей в каналах РИА (каналы совмещены на 60%).

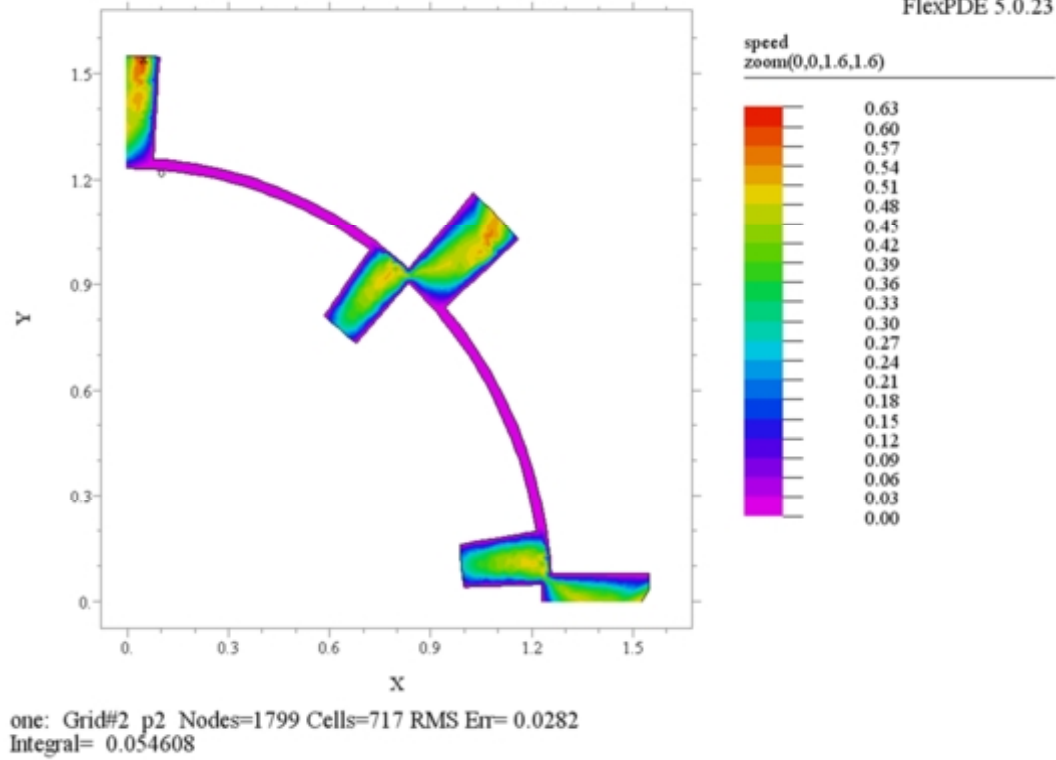
Viscous flow in 2D channel, $Re > 40$ $\nu 1.0$ 21:53:09 5/28/10
FlexPDE 5.0.23

Рис. 2.3.21. Поля скоростей в каналах РИА (каналы совмещены на 20%).

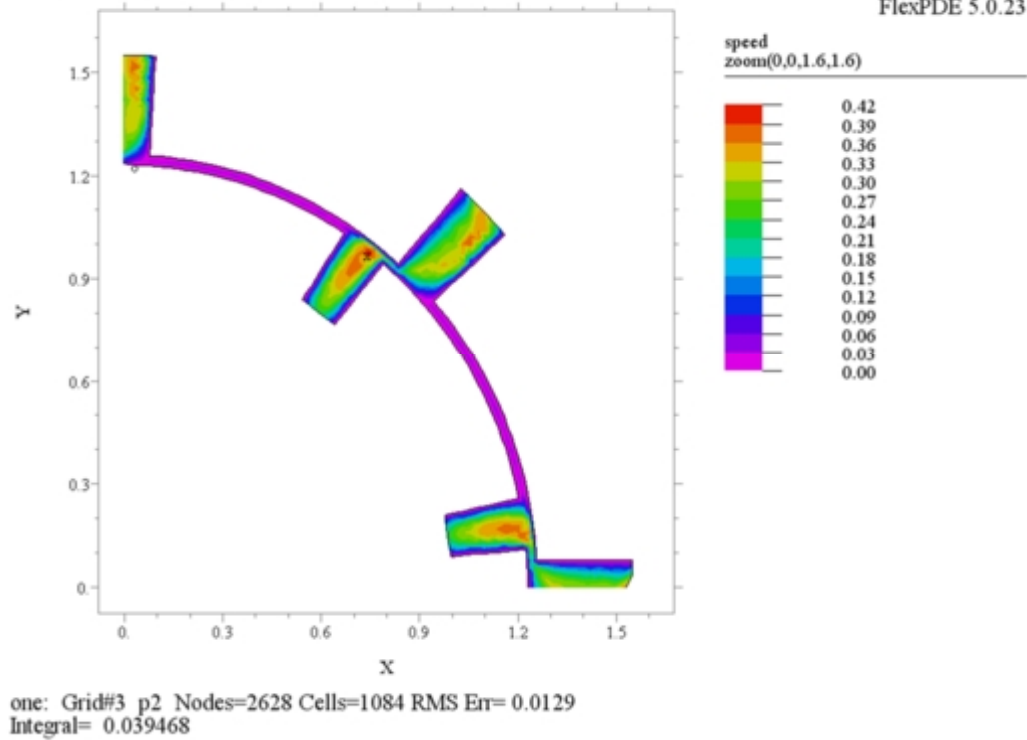
Viscous flow in 2D channel, $Re > 40$ $\nu 1.0$ 22:12:28 5/28/10
FlexPDE 5.0.23

Рис. 2.3.22. Поля скоростей при закрытых каналах.

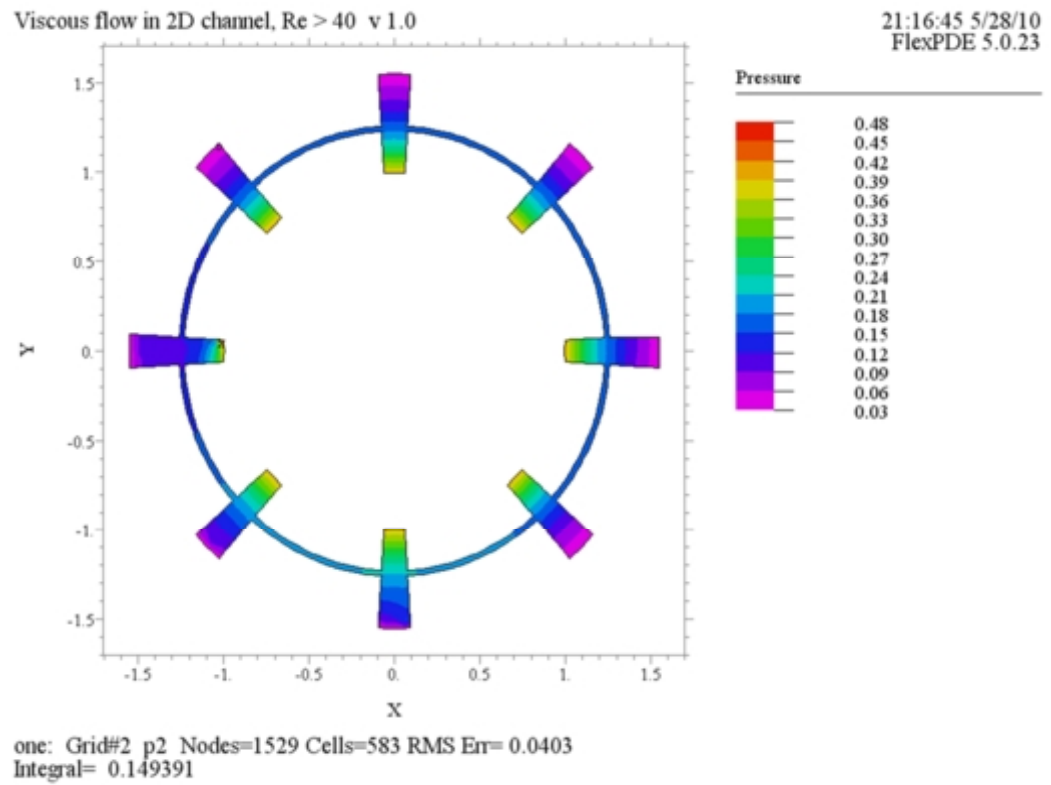


Рис. 2.3.23. Поля давлений при полностью совмещенных каналах.

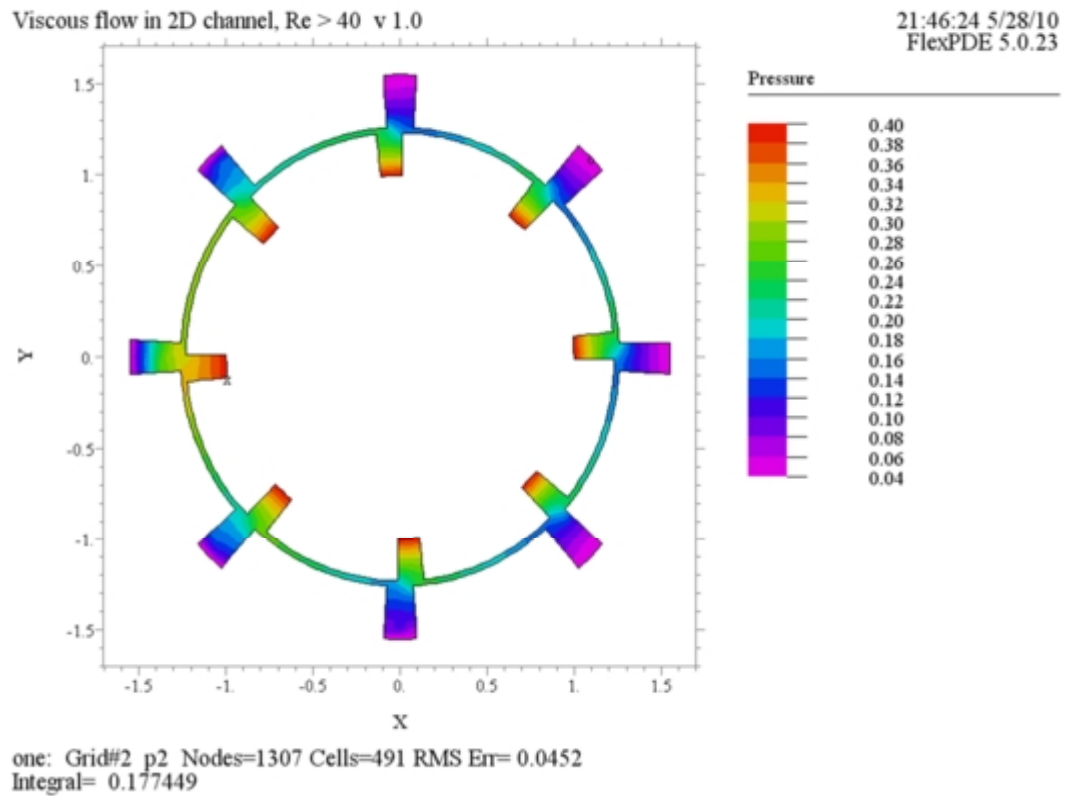


Рис. 2.3.24. Поля давлений в РИА (каналы совмещены на 60%).

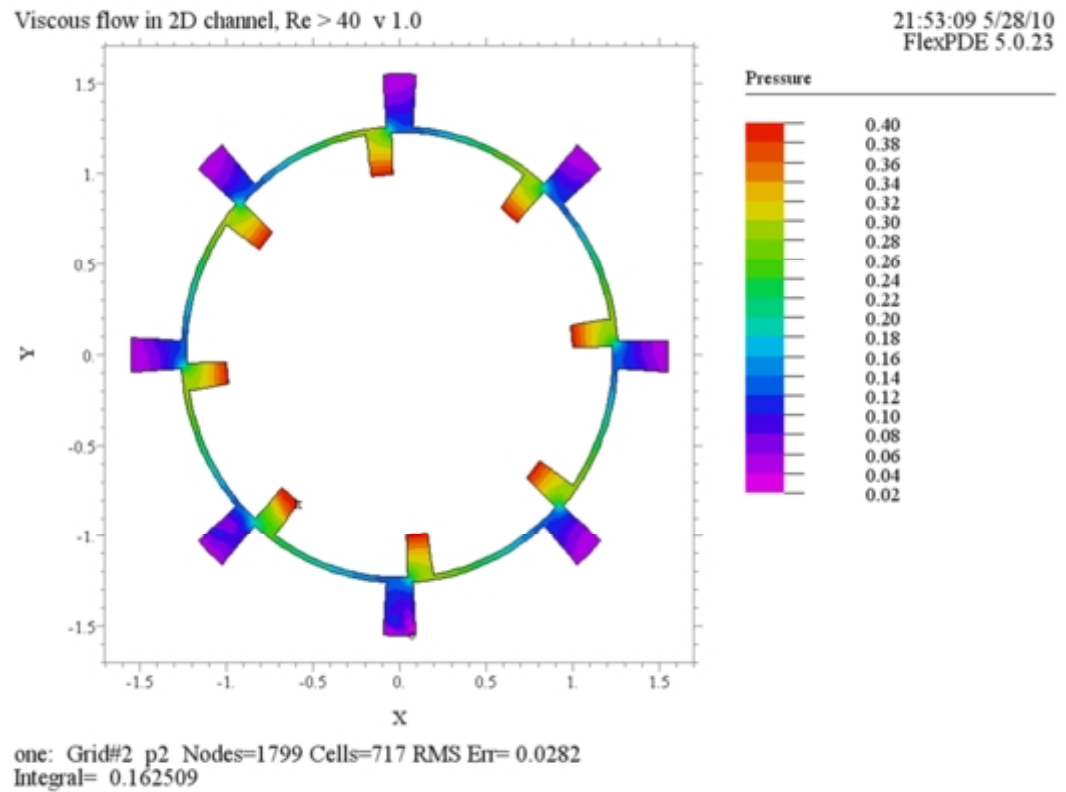


Рис. 2.3.25. Поля давлений в РИА (каналы совмещены на 20%).

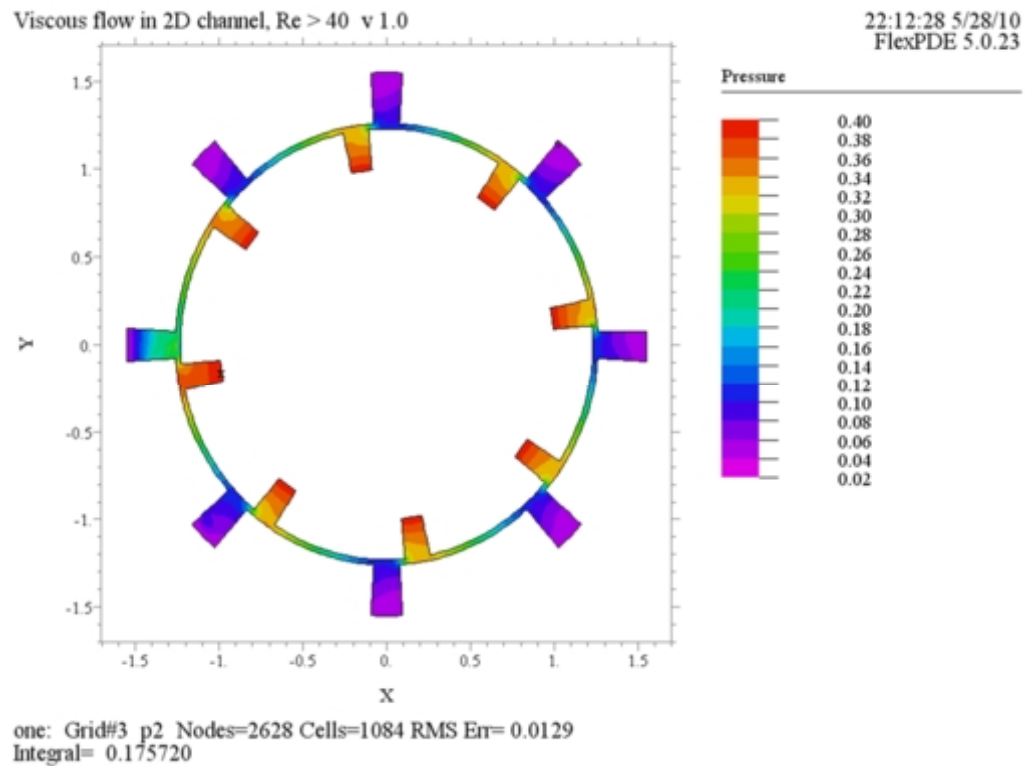


Рис. 2.3.26. Поля давлений при закрытых каналах.

Одним из наиболее мощных программных продуктов для решения гидродинамических задач является система ANSYS. Данный программный продукт использовался для решения системы уравнений Навье–Стокса и уравнения неразрывности (2.2.10). С конечно-элементным анализом – ANSYS CFX фирмы ANSYS Inc. (Лицензионное соглашение № 616773 между CADFEM-CIS и ФГБОУ ВПО «ТГТУ»).

ANSYS CFX – это универсальная программная система конечно-элементного анализа, работающая на основе геометрического ядра Parasolid. Модуль ANSYS CFX работает по методу контрольных объемов, который дает высокую точность. Модуль использует вычислительный блок по давлению, который позволяет решить широкий круг задач гидродинамики. Данный вычислительный блок применяет сетку конечных элементов и формирует уравнения для конечных объемов. В ANSYS CFX вычисления базируются на основных уравнениях движения [109].

Расчет состоит из двух этапов:

1. Создание модели для расчета (проектирование и моделирование области пространства, в которой происходят исследуемые процессы);
2. Просчет модели (задание точности расчета, граничных и начальных условий данной модели).

На первом этапе исследуемая модель может быть создана любым редактором векторной графики: Autodesk Inventor, Autodesk AutoCAD, Kompas, SolidWorks, T-Flex CAD и др.

Основные требования к создаваемой модели:

1) модель должна обладать некоторым внутренним объемом, то есть представлять собой некоторую твердотельную область пространства с ненулевым объемом, но не объект образованный некоторой поверхностью (оболочкой) с нулевой толщиной.

2) модель должна быть в соответствующем формате, адаптивном для среды ANSYS, то есть файл модели, созданный в векторном графическом редакторе должен иметь соответствующее расширение, в данном случае *.sat. При

необходимости файлы с другими расширениями можно конвертировать в вышеуказанный формат при помощи программы CADFix.

Используя данную методику, можно определить численное значение параметров обрабатываемой среды (скорости и давления) в любой точке пространства ротора и статора.

В программном продукте ANSYS был произведен расчет скорости и давления жидкости в области пространства, ограниченной трехмерной моделью внутреннего объема РИА. Задача решалась для следующих условий:

$t = 25, ^\circ\text{C}$ – начальная температура обрабатываемой жидкости (вода);

$P_p = 4 \cdot 10^5$ Па – давление на входе в канал ротора.

$P_c = 4 \cdot 10^4$ Па – давление на выходе из канала статора.

На рис 2.3.27- рис. 2.3.29 представлены примеры результата расчета полей скорости и давления в каналах ротора и статора РИА.

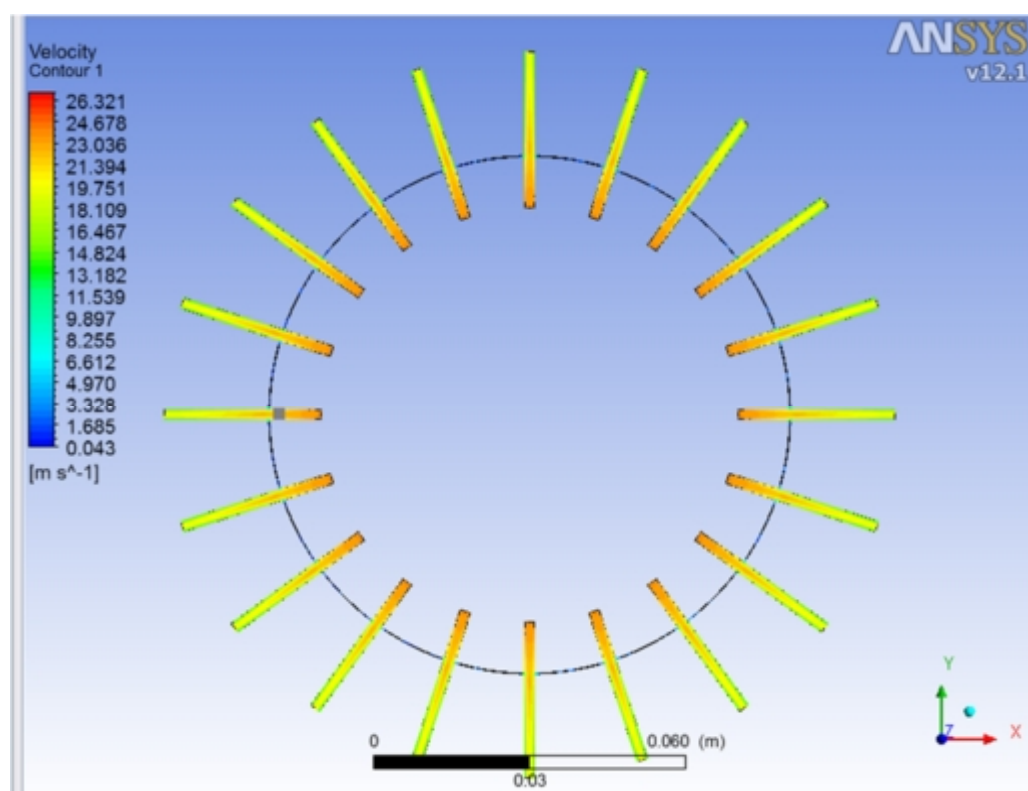


Рис. 2.3.27. Поле скоростей в каналах ротора и статора при их полном совмещении.

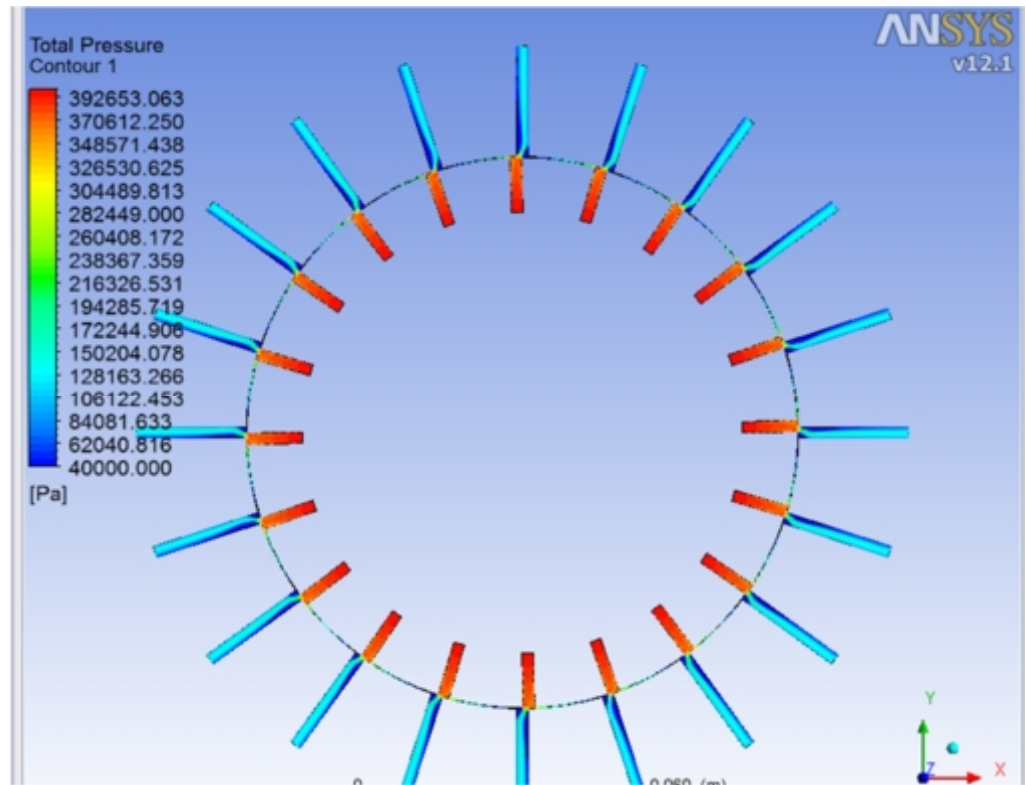


Рис. 2.3.28. Поле давления в каналах ротора и статора при их частичном совмещении.

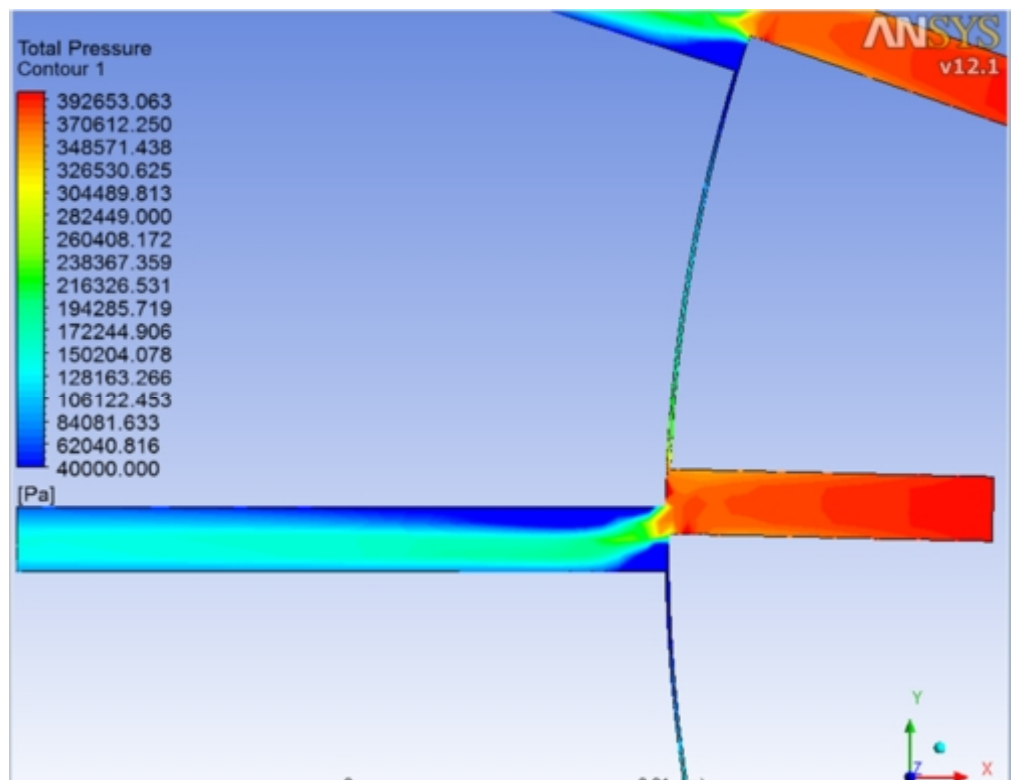


Рис. 2.3.29. Поле давления в канале ротора и канале статора при их частичном совмещении.

Контурные графики полей скорости и давления в каналах ротора и статора приведены в Приложении 5.

Описание программного продукта ANSYS приведено в Приложении 6.

Расчет характеристик РИА численными методами осуществляется на основе нестационарного уравнения Бернулли [2]:

$$\beta \cdot l \cdot \frac{dV}{dt} + \lambda(t) \cdot \frac{l \cdot V^2}{2 \cdot d_9} + \xi(t) \cdot \frac{V^2}{2} + \frac{B(t) \cdot v \cdot V}{2 \cdot d_9} = \frac{\Delta P}{\rho} . \quad (2.2.11)$$

Решение дифференциального уравнения Бернулли можно производить аналитическими и графическими методами, а так же при помощи ЭВМ. Метод, основанный на численном решении нестационарного дифференциального уравнения Бернулли, достаточно полно отражает основные закономерности нестационарных гидромеханических процессов в РИА. Алгоритм решения нестационарного уравнения Бернулли описан в работах [2, 88, 93, 100].

Используя данные скорости, ускорения и давления потока жидкости в каналах статора, полученные на основе решения уравнения Бернулли (2.2.11) численным методом Рунге-Кутты и программными продуктами FlexPDE и ANSYS CFX при одинаковых геометрических и технологических параметрах, сравним точность их решения. Графики потока жидкости в канале статора в зависимости от времени, скорости и ускорения показаны на рис. 2.3.30.

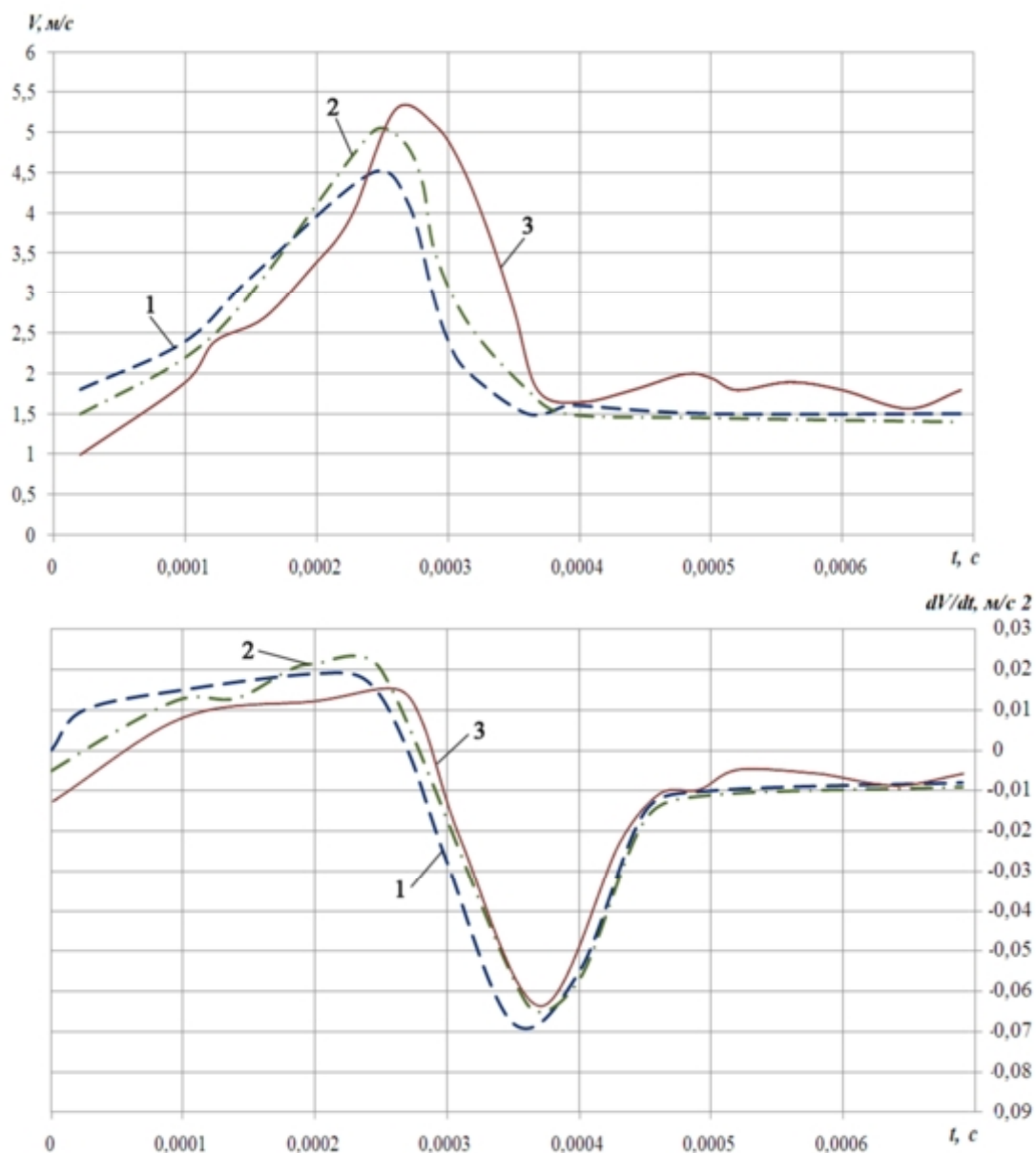


Рис. 2.3.30. Графики зависимости скорости (а) и ускорения (б) потока жидкости, полученные различными методами расчета:

1 – численное решение уравнения (2.2.3); 2 – решение уравнений (2.2.2) программным продуктом ANSYS CFX; 3 – экспериментальные данные по данным рис. 2.3.31.

Анализ результатов, представленных на рис. 2.3.30 показывает, что разница в результатах расчета скорости и ускорения потока жидкости в канале статора РИА при численном решении уравнения (2.2.11) и при решении уравнений (2.2.10) программным продуктом ANSYS CFX не превышает 10 %. Точные данные

скорости и ускорения в канале ротора и статора по времени и координатам позволяет получить программный продукт ANSYS.

На рис. 2.3.31 показаны графики зависимости давления в потоке жидкости от времени, полученные при численном решении уравнения (2.2.11) и при решении уравнений (2.2.10) программным продуктом ANSYS CFX. Расчетные графики зависимости осредненного давления от времени в канале статора удовлетворительно сходятся с экспериментальными данными [2].

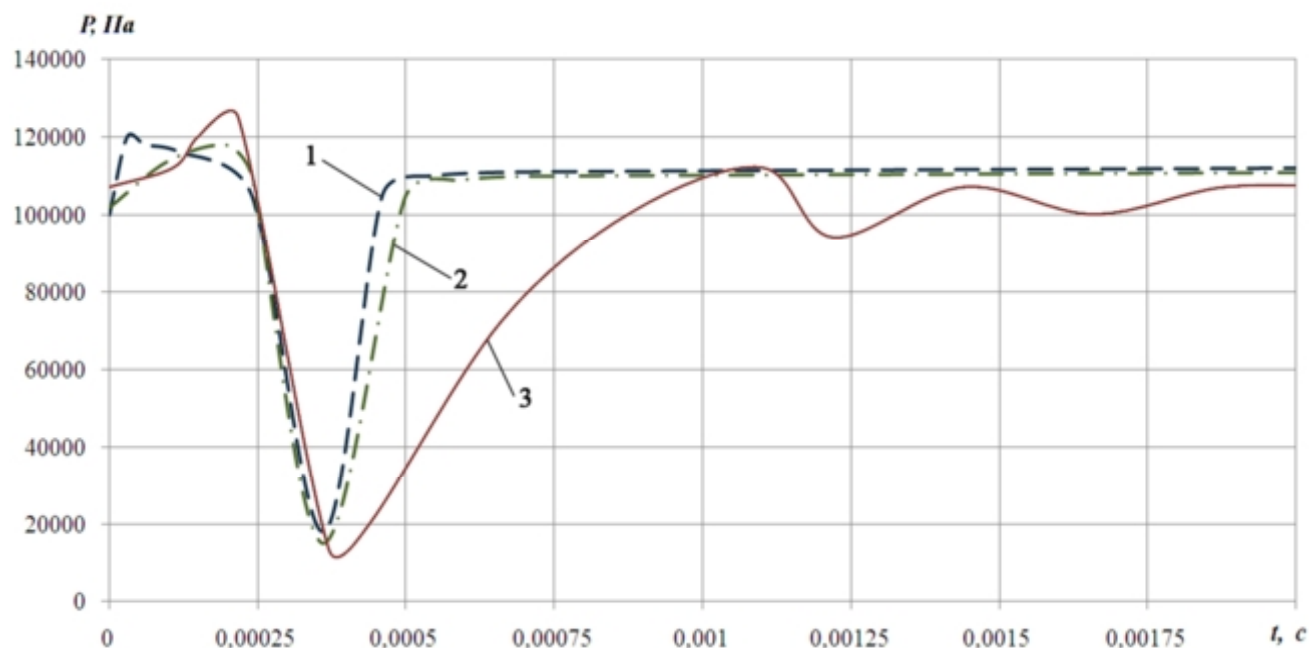


Рис. 2.3.31. Графики зависимости давления в потоке жидкости, полученные различными методами расчета:

1 – численное решение уравнений (2.2.10); 2 – решение уравнения (2.2.11) программным продуктом ANSYS CFX; 3 – график зависимости давления потоке жидкости, полученный по экспериментальным данным [2].

На основании данных вычислительных экспериментов по определению влияния геометрических и режимных параметров РИА на величины скорости, ускорения, расхода и давления потока жидкости в канале статора выполнен анализ зависимостей скорости, ускорения, расхода и импульсного давления в канале статора от основных геометрических и режимных параметров РИА позволяет определить влияние основных параметров аппарата на характеристики

потока жидкости в канале статора. Результаты вычислительных экспериментов даны в Приложении 7. Результаты анализа приведены в таблице 2.3.1.

Таблица 2.3.1

Влияние варьируемых величин на изменение зависимостей скорости, ускорения, расхода и импульсного давления в канале статора.

Увеличиваемый параметр	Обозначение	Диапазон значений параметра	Влияние параметра на характеристики потока жидкости в канале статора *			
			$V(t)$	$V(t)/dt$	$Q(t)$	$P_u(t)$
Угловая скорость вращения ротора, c^{-1}	ω	200 - 450	+	+	+	+
Статическое давление, Па	P_{cm}	$1 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$	+	+	+	+
Зазор между ротором и статором, м	δ	$5 \cdot 10^{-5} - 2,5 \cdot 10^{-4}$	+	-	+	-
Радиус ротора, м	R_p	0,075 - 0,15	+	+	+	+
Длина каналов ротора, м	l_p	0,01 - 0,03	-	-	-	-
Ширина каналов, м	a	0,001 - 0,003	0	+	+	+
Высота каналов, м	h	0,01 - 0,03	0	0	+	+

* Условные обозначения:

«+» - увеличение параметра способствует увеличению величины характеристики потока жидкости в канале статора;

«-» - увеличение параметра способствует уменьшению величины характеристики потока жидкости в канале статора;

0 - увеличение параметра несущественно влияет на величину характеристики потока жидкости в канале статора РИА

На основе анализа зависимостей скорости, ускорения, расхода и импульсного давления в канале статора от основных геометрических и режимных параметров РИА для изготовления РИА можно рекомендовать следующие соотношения геометрических параметров: $5 \leq l_{p,c}/a_{p,c} \leq 10$; $250 \leq R_p/\delta \leq 1250$; $5 \leq h_{p,c}/a_{p,c} \leq 15$; $144 \leq z/R_p \leq 480$.

Рекомендации по совершенствованию и расчету основных характеристик РИА используются при изготовлении и эксплуатации аппаратов в ООО «Амальтеа-Сервис», г. Москва (Приложение 8).

2.4. Выводы по второй главе

Выполнен анализ процесса экстрагирования в РИА и показана эффективность его применения для интенсификации процесса экстрагирования ГК из гуматосодержащего сырья.

Рассмотрено влияние основных технологических и геометрических параметров РИА на коэффициент массоотдачи при экстрагировании гуминовой кислоты. На основе проведенного анализа зависимостей $\varepsilon = f(\omega R_p, \delta, \beta)$ установлено, что уменьшение величины зазора между ротором и статором δ и увеличение скорости совмещения канала ротора с каналом статора ωR_p приводит к увеличению величины диссипации энергии ε и, следовательно, к увеличению коэффициента массоотдачи для процесса экстрагирования целевого компонента из твёрдой фазы в жидкость.

Выполнен анализ основных характеристик РИА для процесса экстрагирования (производительность, потребляемая мощность и параметр, определяющий эффективность работы оборудования - импульсное давление)

Для расчета кинетических уравнений процесса экстрагирования в РИА проведен анализ различных методов расчета скорости, ускорения и импульсного давления потока жидкости в канале статора РИА с применением программных продуктов FlexPDE и ANSYS CFX.

Используя данные скорости, ускорения и давления потока жидкости в каналах статора, полученные на основе решения уравнения Бернулли численным методом и программными продуктами FlexPDE и ANSYS CFX был выполнен анализ точности их решения.

Установлено, что расчетные данные значений скорости и ускорения, адекватные экспериментальным данным, позволяет получить численный метод решения нестационарного уравнения Бернулли и программный продукт ANSYS CFX.

Разработан программный продукт для ЭВМ по расчету полей скорости и давления в РИА, в котором реализован алгоритм расчета параметров РИА. Данная программа позволяет рассчитать такие характеристики как скорость, ускорение, расход и давление, а так же отобразить полученные зависимости в графической форме.

Рекомендации по соотношению основных параметров РИА ($5 \leq l_{p,c}/a_{p,c} \leq 10$; $250 \leq R_p/\delta \leq 1250$; $5 \leq h_{p,c}/a_{p,c} \leq 15$; $144 \leq z/R_p \leq 480$) используются для изготовления и эксплуатации РИА в ООО «Амальтеа-Сервис» (г. Москва).

Глава 3. Экспериментальные исследования процесса экстрагирования в роторном импульсном аппарате

3.1. Описание стендов на базе роторных импульсных аппаратов для экспериментальных исследований

Для экспериментальных исследований технологических характеристик роторных импульсных аппаратов был разработан многофункциональный испытательный стенд, технологическая схема которого показана на рис.3.1.1.

Экспериментальная установка включала в себя взаимозаменяемые роторные импульсные аппараты РИА–150, РИА–200, РИА–250 (1), каждый из которых был смонтирован на индивидуальной станине с электродвигателем (9) через упругую втулочно-пальцевую муфту (10), два заменяемых насоса: шестеренчатый насос марки НМШГ 20-25-14/10 и центробежный насос марки К50/30 (17) которые применялись для подачи в РИА вязких и маловязких жидкостей; емкость с рубашкой (2) для модельной жидкости; линия подвода воды (5) и отвода воды (6); патрубок для отбора проб и слива жидкости из гидравлического контура (7); патрубок удаления воздуха (8); подводящий трубопровод (3) и отводящий трубопровод (4). Расход жидкости в системе регулировали при помощи вентилей (11) и измеряли расходомером (14) (турбинный счетчик с механическим счетным механизмом марки ВМГ-50).

Давление в рабочей камере и полости ротора фиксировали образцовыми манометрами (13), а температуру – цифровым одноканальным датчиком температуры (15) марки SH-04016.

Частоту вращения ротора изменяли при помощи частотного преобразователя (16) Toshiba TOSVERT VF – S11, подключенного через протокол связи RS485 к персональному компьютеру для управления и записи параметров частоты вращения вала электродвигателя и мощности аппарата при работе. Частоту вращения вала насоса изменяли при помощи частотного преобразователя (18) марки ВЕСПЕР EI-7011-100Н.

Фотографии экспериментального стенда представлены на рис. 3.1.2.

Установка работает следующим образом. Модельная жидкость (вода, суспензия) заливается в емкость (2) через вентиль (11) расположенный на подводящем трубопроводе (3). Перед включением вручную проворачивали валы РИА и насосов для того, чтобы убедиться в отсутствии заклинивания. Через всасывающий трубопровод жидкость насосом 17, работающим на малых оборотах, из ёмкости нагнетается в РИА. Модельная жидкость, пройдя каналы ротора, зазор и каналы статора попадает в рабочую камеру, затем через выходные патрубки и трубопровод поступает в исходную емкость. Движение жидкости происходит по замкнутому контуру. В верхней точке контура расположен вентиль (12) для удаления воздуха.

В качестве нагнетающего оборудования использовали шестеренчатый насос объёмной подачи, у которого расход (подача) прямо пропорционален частоте вращения вала электродвигателя и центробежный насос. При определении расхода жидкости (производительности) расходомером (12) и давления манометрами (13) поддерживали постоянную температуру рабочей среды с помощью циркуляции охлаждающей воды в рубашке емкости через линии подвода воды (5) и отвода воды (6).

Для экспериментальных исследований основных характеристик роторных импульсных аппаратов использовались три типа аппаратов, геометрические и режимные параметры которых приведены в таблице 3.1.1. В качестве основных параметров обозначены: $a_{p,c}$ – ширина каналов ротора и статора, м; b_p – расстояние между стенками каналов ротора, м; b_c – расстояние между стенками каналов статора, м; R_p – радиус ротора, м; h – высота каналов ротора и статора, м; δ – зазор между ротором и статором, м; $l_{p,c}$ – длина ротора и статора, м; z – количество каналов ротора и статора, м; ω – угловая скорость, 1/с; Q – расход м³/с; N – мощность электродвигателя, Вт.

Параметры роторных импульсных аппаратов

РИА-150		РИА-200		РИА-250	
a_p	3 мм	a_p	2 мм	a_p	3 мм
a_c	3 мм	a_c	2 мм	a_c	3 мм
h	16 мм	h	20 мм	h	50 мм
b_p	22 мм	b_p	24 мм	b_p	19 мм
b_c	22 мм	b_c	24 мм	b_c	19 мм
R_p	75 мм	R_p	100 мм	R_p	125 мм
δ	0,1 мм	δ	0,1 мм	δ	0,1 мм
l_p	12 мм	l_p	12 мм	l_p	16 мм
l_c	17 мм	l_c	22 мм	l_c	25 мм
z	18	z	24	z	36
ω	50-450 с ⁻¹	ω	50-450 с ⁻¹	ω	50-450 с ⁻¹
Q	1-7 м ³ /ч	Q	2-10 м ³ /ч	Q	5-40 м ³ /ч
N	до 5 кВт	N	до 9 кВт	N	до 18 кВт

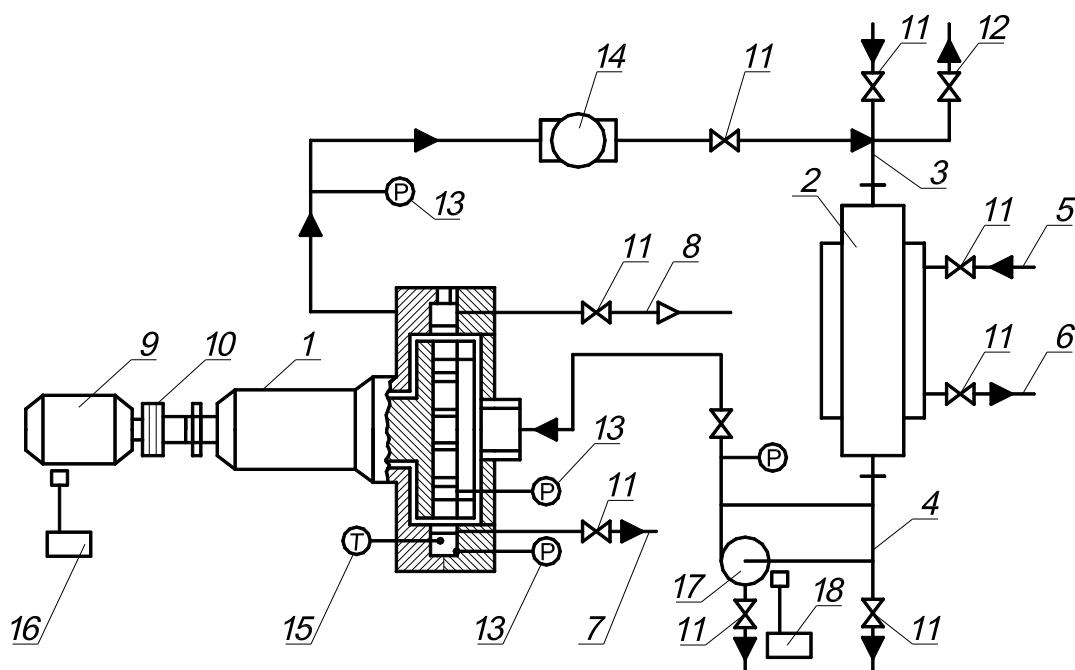


Рис. 3.1.1. Технологическая схема экспериментального стенда.

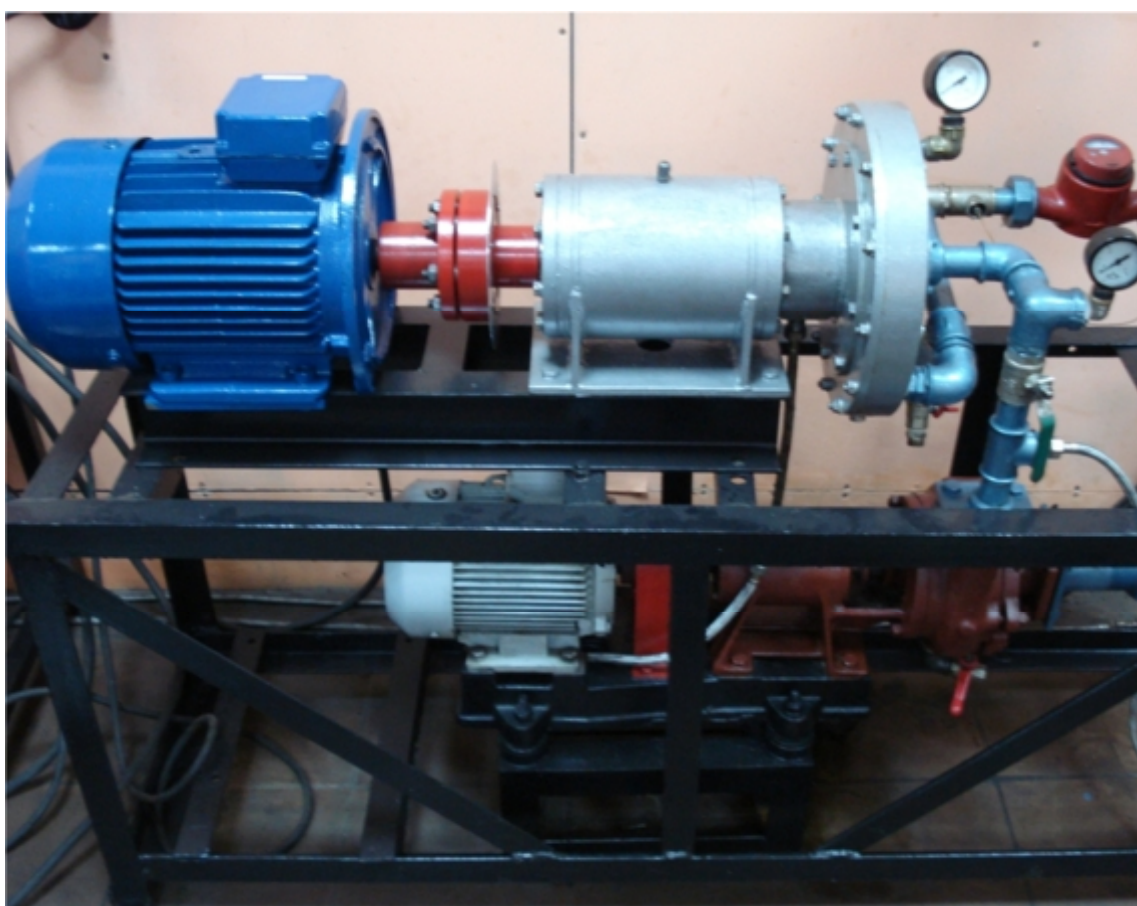


Рис. 3.1.2. Фотографии экспериментального стенда.

3.2. Экспериментальные исследования процесса экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате

В задачи исследования входило экспериментальное изучение процесса экстрагирования гуминовых кислот в воду из биогумуса, полученных образцов суспензии биогумуса на расслоение в течение длительного промежутка времени. Эксперименты по экстрагированию проводили в емкостном аппарате с ленточной мешалкой и на установке с РИА. Экстрагирование осуществлялось с водой и водным раствором КОН (1%).

Экспериментальные исследования проведены с сухим гуматсодержащим сырьём – биогумус, предоставленным ООО «Биогумус» г. Тамбова.

Технологическая схема лабораторной установки для обработки суспензии биогумус – вода на базе РИА приведена на рисунке 3.2.1. На рисунке 3.2.2. показана фотография экспериментальной установки.

Обрабатываемые компоненты подаются через кран (поз. 2) в емкость (поз.3) или при снятой верхней крышке емкости. При закрытых кранах (поз. 1, 2, 5, 7, 10, 13, 14) и включённом шестеренном насосе (поз. 8) производится предварительное перемешивание компонентов и удаление из суспензии воздуха через воздухоотводчик поз. 4. Суспензия при помощи насоса (поз. 8) и открытых кранах (поз. 6, 10,13) (остальные краны при этом закрыты) подаётся в РИА (поз. 11), где происходит основная обработка компонентов. Обработка компонентов может осуществляться в циклическом режиме по замкнутому контуру перекачиванием их из емкости (поз.3) насосом (поз. 8) через РИА (поз. 11) обратно в емкость (поз.3).

После прохождения компонентами необходимого для обработки числа циклов производится удаление суспензии через кран (поз. 12). Так же, слив суспензии может производиться через краны поз. 5, 7 и 14. Через кран (поз. 14) может производиться отбор проб.

С помощью датчиков поз. 15, 16, 17, 18 производится измерение давления, температуры и расхода компонентов во время технологического процесса обработки суспензии или других вспомогательных операций.

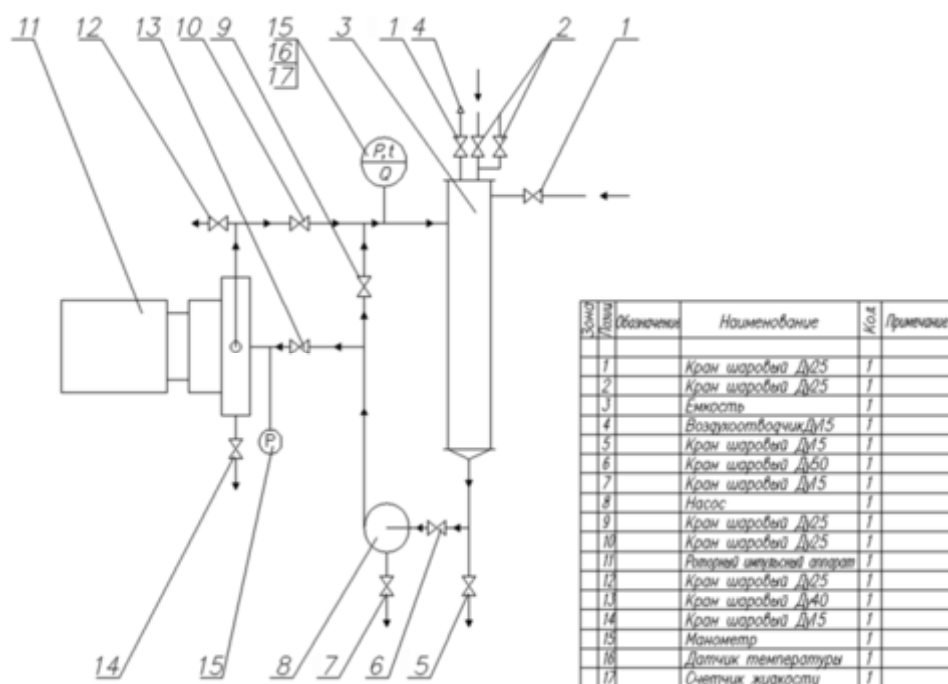


Рис. 3.2.1. Технологическая схема установки для приготовления суспензии биогумус – вода на базе роторного импульсного аппарата.



Рис. 3.2.2. Фотография экспериментальной установки на базе РИА.

Установка работает следующим образом: сухой биогумус проходит ситовый просев, из него удаляются чужеродные частицы. Очищенный биогумус засыпается в необходимой концентрации в емкость 3, наполненную водой. Суспензия из емкости 3 направляется в РИА 11, в котором подвергается механической и гидродинамической обработке. Механическое воздействие РИА измельчает твердые частицы в суспензии, происходит увеличение поверхности фазового контакта, открытие пор и механическая активация твердых частиц. Разгонно-тормозной характер движения потока жидкости в РИА вызывает пульсации давления и скорости потока жидкости, интенсивную турбулентность и развитую кавитацию.

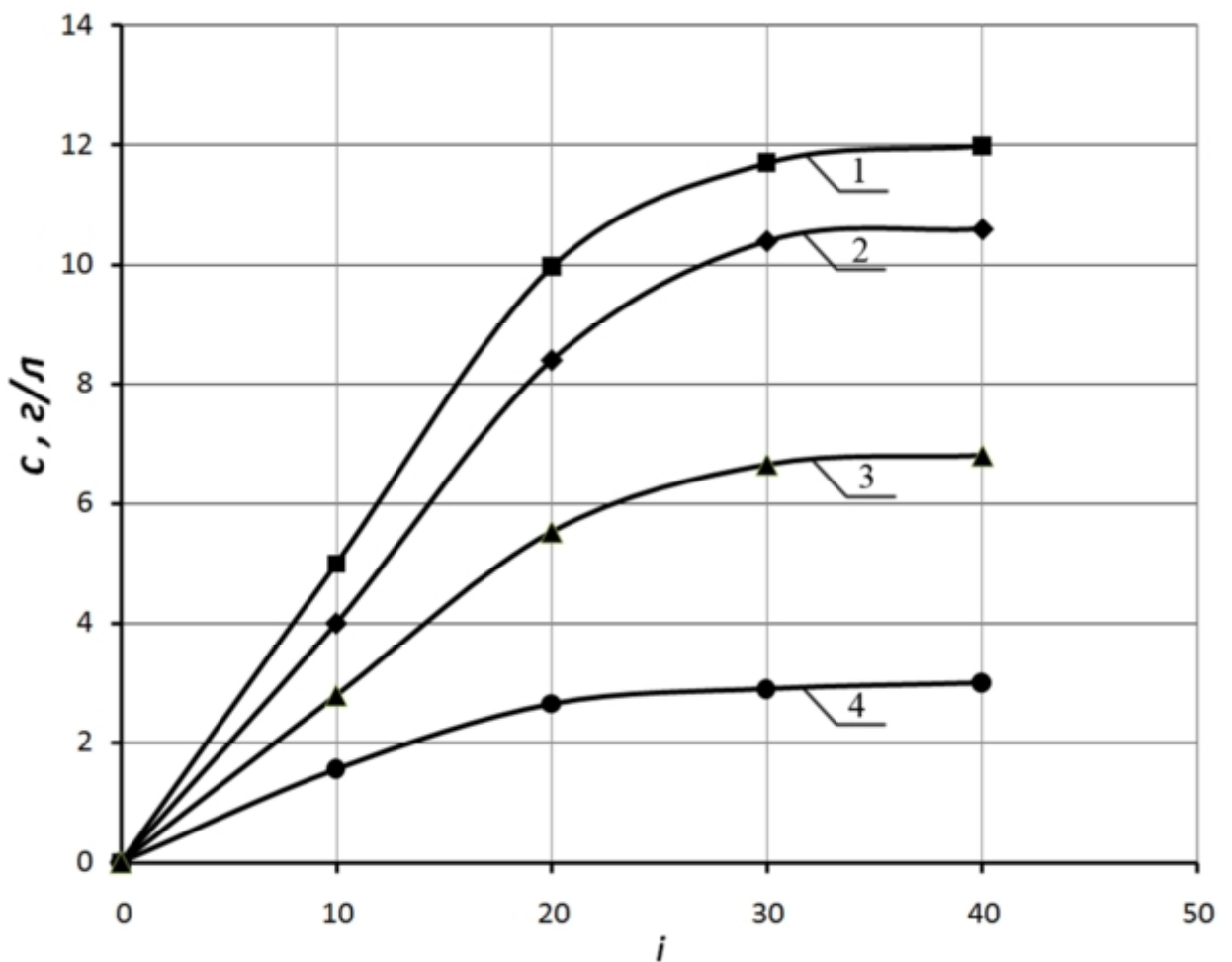


Рис. 3.2.3. Графики изменения концентрации гуминовых кислот в водном растворе в зависимости от количества циклов обработки в РИА и соотношения жидкой и твердой фаз:

1 – $L/G = 4$; 2 – $L/G = 5$; 3 – $L/G = 10$; 4 – $L/G = 15$.

На основе анализа кинетических закономерностей процесса экстрагирования гуминовых кислот в воду из биогумуса при обработке суспензии в РИА уравнение (3.2.1) дополнено безразмерными параметрами (L/G) и (t/t_1) в соответствии с рекомендациями [15, 16], показывающими соотношение жидкой и твердой фаз и безразмерного времени экстрагирования. Здесь L – масса жидкой фазы, G – масса твердой фазы, t – время экстрагирования, t_1 – время совмещения каналов ротора с каналами статора.

$$Sh_v = A \cdot Sc^b \cdot Re^g \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^c \cdot \left(\frac{t}{t_1}\right)^d \quad (3.2.1)$$

Для определения эмпирических коэффициентов в уравнении (3.2.1) были проведены экспериментальные исследования экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса в зависимости от количества циклов обработки суспензии i в РИА, результаты которых показаны на рис. 3.2.3.

Коэффициент $b = 0,33$ принят по данным из работ [15, 16]. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных позволил установить коэффициенты A, c, d, g для уравнения (3.2.1).

$$Sh_v = 193 \cdot 10^{-6} \cdot Sc^{0,33} \cdot Re^{0,7} \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{-1,73} \cdot \left(\frac{t}{t_1}\right)^{-0,52} \quad (3.2.2)$$

На рис. 3.2.4 показаны графики расчетной зависимости модифицированного числа Шервуда по уравнению (3.2.2) и точки, полученные на основе

экспериментальных данных по уравнению $Sh_v = \frac{K_{cv} \cdot d_{cp}^2}{D_{эф} \cdot \rho}$.

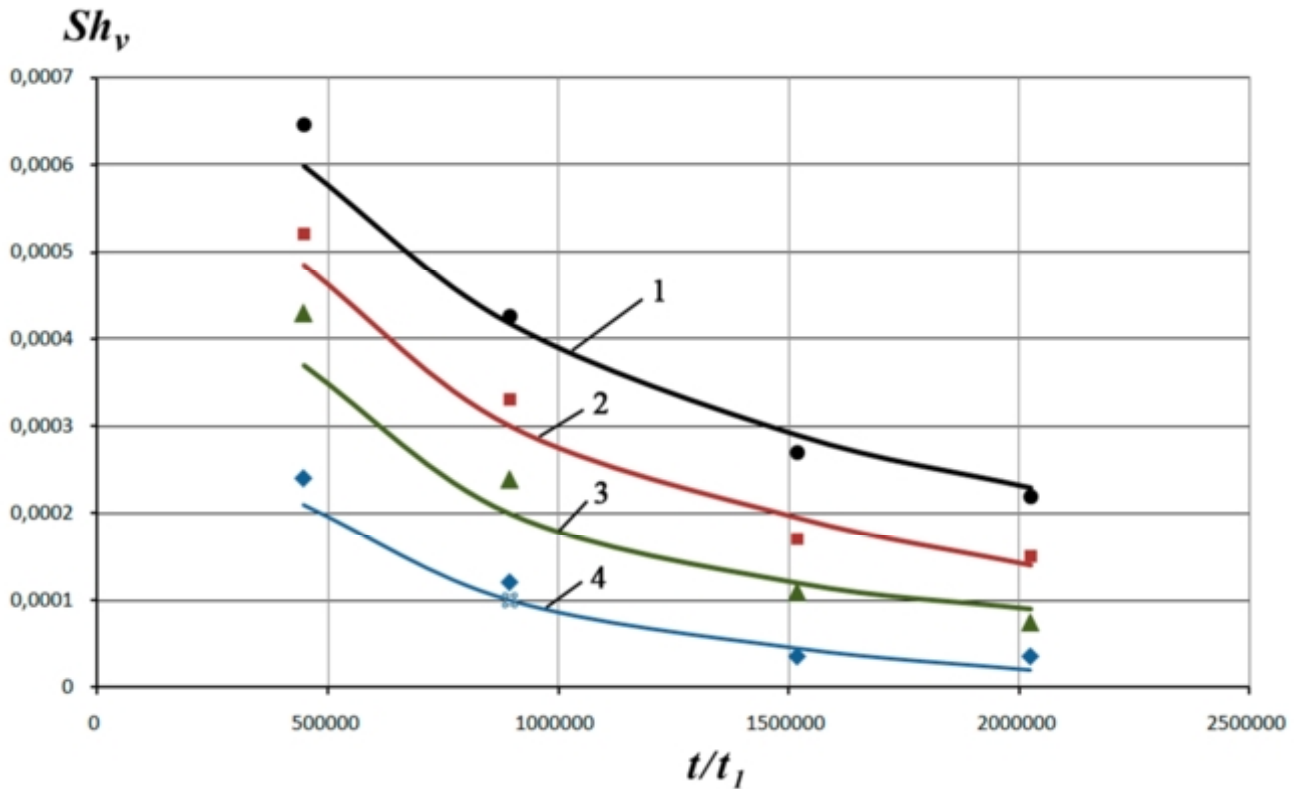


Рис. 3.2.4. Графики расчетных зависимостей числа Шервуда от безразмерного времени экстрагирования. Точки – экспериментальные данные.

1 – $L/G = 4$; 2 – $L/G = 5$; 3 – $L/G = 10$; 4 – $L/G = 15$.

Критериальное уравнение (3.2.2) удовлетворительно описывает процесс экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса в воду, реализуемый в роторном импульсном аппарате. Расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 15%.

Расход жидкости через канал ротора и статора за период их совмещения рассчитывается по выражению, $\text{м}^3/\text{ч}$ [72]:

$$Q_1 = \frac{1}{t_1} \left(\int_0^{t_1} Q(t) dt \right); \quad Q(t) = V(t) \cdot S(t). \quad (3.2.3)$$

Здесь V – скорость потока жидкости в канале статора, $\text{м}/\text{с}$; S – площадь, через которую поток жидкости протекает из канала ротора в канал статора, м^2 . Методы определения $V(t)$ и $S(t)$ приведены в различной литературе, например в [2, 55, 68, 88, 89, 93].

Принимаем $a=a_c=a_p$, $b=b_c=b_p$, $h=h_c=h_p$. С учетом этого время совмещения канала ротора с каналом статора:

$$t_1 = 2a/(\omega \cdot R_p) \quad (3.2.4)$$

Расход жидкости через один канал статора при транзитных течениях через зазор между ротором и статором, в период времени, когда канал ротора не совмещен с каналом статора, определяется по формуле [72]:

$$Q_2 = \frac{1}{T-t_1} \left(\int_{t_1}^T Q(t) dt \right). \quad (3.2.5)$$

$$T = \frac{a+b}{\omega \cdot R_p}; \quad (3.2.6)$$

Средний расход через один канал статора за весь период времени T определяется как

$$Q_{cp} = Q_1 + Q_2. \quad (3.2.7)$$

Общий расход через все каналы z статора $Q_{полн}$ равен:

$$Q_{полн} = Q_{cp} \cdot z_p \cdot z_c \cdot \omega / 2\pi. \quad (3.2.8)$$

Если число каналов в роторе равно числу каналов в статоре $z=z_c=z_p$, то

$$Q_{полн} = Q_{cp} \cdot z^2 \cdot \omega / 2\pi. \quad (3.2.9)$$

Одним из основных конструктивных признаков РИА является исполнение ротора и статора в форме дисков (осевые) или цилиндров (радиальные). В первом случае каналы для прохода жидкости соосны с осью вращения ротора, во втором – находятся в цилиндрических стенках ротора и статора, течение потока жидкости проходит в радиальном направлении. К достоинствам конструкции РИА радиального типа относится механизм создания центробежных сил, воздействующих на обрабатываемую жидкость в полости ротора и увеличивающий движущую силу – перепад давления между полостью ротора и рабочей камерой.

Для уточнения влияния вязкости жидкости и центробежных сил при течении жидкости в полости ротора без лопаток, а также для расчета расхода жидкости через аппарат, надо добавить поправочную функцию $f(\omega R_p, \mu)$:

$$Q = Q_{полн} + f(\omega R_p, \mu). \quad (3.2.10)$$

Поправочная функция $f(\omega, R_p, \mu)$ определяет влияние центробежных сил на течение жидкости в полости ротора без внутренних лопаток. Центробежные силы, действующие на жидкость внутри ротора, в основном, зависят от радиуса ротора R_p и его угловой скорости вращения ω . Принято, что радиус ротора значительно больше длины канала в цилиндрической стенке ротора и условия течения потока жидкости в канале ротора не влияют на общий характер течения жидкости в роторе. Проскальзывание слоев жидкости относительно друг друга и относительно поверхности ротора зависит от коэффициента динамической вязкости жидкости μ .

Физический смысл поправочной функции заключается в следующем. В каждой точке внутри полости ротора на жидкость действуют две силы, расположенные относительно друг друга под прямым углом. Центробежная сила действует вдоль радиальной оси, от центра ротора к его цилиндрической стенке. Центробежная сила способствует увеличению центробежного давления и расхода через РИА радиального типа. Тангенциальная сила сцепления жидкости с внутренней поверхностью ротора направлена перпендикулярно радиальной оси и способствует уменьшению расхода жидкости через аппарат. Центробежная сила имеет квадратичную зависимость от угловой скорости и радиуса ротора. Тангенциальная сила имеет линейную зависимость от угловой скорости и радиуса ротора.

Если ротор конструктивно выполнен без верхней крышки, то есть верхней крышкой служит крышка корпуса аппарата, то физическая картина действия внутренних сил на жидкость в полости ротора усложняется, так как слои жидкости, прилегающие к крышке корпуса, неподвижны и тормозят движение жидкости как в радиальном, так и в тангенциальном направлении.

Учитывая сложность физической картины действия сил на жидкость внутри полости ротора с одной неподвижной крышкой, целесообразно провести экспериментальные исследования для определения вида и эмпирических коэффициентов в поправочной функции $f(\omega, R_p, \mu)$, влияния параметров угловой скорости и радиуса ротора, а также вязкости жидкости на расход через РИА.

В соответствии с подходом к расчету потребляемой мощности, предложенным Промтовым М.А. в [56], а также с учетом работ [50, 58], формула для определения мощности может быть записана в виде:

$$N = A \cdot \text{Re}^{-B} \cdot \left(\frac{\delta}{R_p} \right)^{0.2} \cdot \left(\frac{a \cdot z_p}{R_p} \right)^{0.7} \cdot \omega^3 \cdot \rho \cdot R_p^4 \cdot h_p, \quad (3.2.11)$$

где $A = k_1 \mu / \rho$; $B = k_2 \mu / \rho$; h_p – высота ротора, м; $\text{Re} = \omega \cdot R_p^2 \cdot \rho / \mu$; k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты, подлежащие определению.

В работе [56] эмпирические коэффициенты были определены для РИА с постоянным радиусом и высотой ротора. Параметры вязкости и плотности жидкости входят в критерий Рейнольдса. В соответствии с подходом в работе [56], установлено, что критерий $\text{Re} = \omega \cdot R_p^2 \cdot \rho / \mu$ влияет на мощность для преодоления трения в зазоре между ротором и статором и нелинейно зависит от вязкости и плотности жидкости.

По данным, приведенным в работе [72], показано, что мощность линейно зависит от расхода через РИА, коэффициент пропорциональности возрастает с увеличением скорости вращения ротора прямо пропорционально квадрату угловой скорости вращения ротора.

Для определения эмпирических коэффициентов, необходимых для расчета основных характеристик РИА, были проведены эксперименты по определению влияния радиуса и угловой скорости ротора, вязкости модельной жидкости на расходные характеристики и потребляемую мощность установок на базе РИА – 150, РИА – 200, РИА – 250. Результаты экспериментальных и расчетных данных для РИА – 150 и РИА – 250 представлены в таблице 3.2.1 и таблице 3.2.2

Таблица 3.2.1

Результаты экспериментальных и расчетных данных для РИА-150

$\omega = 62,8$, рад/с				$N_{xx} = 0,05$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	0,4	4,53	4,39	0,035	0,038
$P_{вх}=3$, атм	0,6	5,32	5,75		
$P_{вх}=4$, атм	0,8	5,92	5,02		

$\omega = 125,6$, рад/с				$N_{xx} = 0,15$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	0,4	4,53	4,51	0,2	0,202
$P_{вх}=3$, атм	0,6	5,32	5,89		
$P_{вх}=4$, атм	0,8	5,93	5,20		

$\omega = 188,4$, рад/с				$N_{xx} = 0,4$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	0,45	4,72	4,08	0,5	0,511
$P_{вх}=3$, атм	0,6	5,36	5,45		
$P_{вх}=4$, атм	0,8	6,02	6,48		

$\omega = 251, 2$, рад/с				$N_{xx} = 0,75$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	0,5	5,0	5,52	0,9	0,971
$P_{вх}=3$, атм	0,65	5,42	5,31		
$P_{вх}=4$, атм	0,8	6,07	6,37		

$\omega = 314$, рад/с				$N_{xx} = 1,2$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	0,55	5,32	5,12	1,6	1,635
$P_{вх}=3$, атм	0,7	5,66	5,51		
$P_{вх}=4$, атм	0,8	6,3	6,1		

$\omega = 376,8$, рад/с				$N_{xx} = 1,8$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	0,65	5,76	5,39	2,6	2,519
$P_{вх}=3$, атм	0,8	6,14	5,76		
$P_{вх}=4$, атм	1,0	6,62	6,09		

$\omega = 439,6$, рад/с				$N_{xx} = 2,6$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	0,75	6,24	6,35	3,8	3,801
$P_{вх}=3$, атм	1,0	6,75	6,63		
$P_{вх}=4$, атм	1,35	6,95	6,86		

Таблица 3.2.2

Результаты экспериментальных и расчетных данных для РИА-200.

$\omega = 62,8$, рад/с				$N_{xx} = 0,05$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	0,4	2,72	2,55	0,1	0,086
$P_{вх}=3$, атм	1,2	2,89	2,85		
$P_{вх}=4$, атм	1,8	3,65	3,13		

$\omega = 125,6$, рад/с				$N_{xx} = 0,3$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	0,8	3,02	3,62	0,4	0,408
$P_{вх}=3$, атм	1,8	3,32	3,58		
$P_{вх}=4$, атм	2,4	3,79	3,52		

$\omega = 188,4$, рад/с				$N_{xx} = 0,8$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	0,9	3,36	3,19	1,0	1,122
$P_{вх}=3$, атм	1,9	3,69	3,55		
$P_{вх}=4$, атм	2,5	4,05	3,92		

$\omega = 251, 2$, рад/с				$N_{xx} = 1,6$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	2,0	3,58	3,05	1,8	1,842
$P_{вх}=3$, атм	3,0	4,03	3,42		
$P_{вх}=4$, атм	4,0	4,35	3,81		

$\omega = 314$, рад/с				$N_{xx} = 3,0$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{эксп}$, кВт	$N_{расч}$, кВт
$P_{вх}=2$ атм	3,0	4,02	4,26	3,2	3,254
$P_{вх}=3$, атм	4,0	4,48	4,62		
$P_{вх}=4$, атм	5,0	4,53	5,05		

$\omega = 376,8$, рад/с				$N_{xx} = 5,0$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{ЭКСП}$, кВт	$N_{РАСЧ}$, кВт
$P_{вх} = 2$ атм	3,0	4,33	5,52	5,9	5,986
$P_{вх} = 3$, атм	4,0	4,81	5,86		
$P_{вх} = 4$, атм	5,0	4,82	6,27		

$\omega = 439,6$, рад/с				$N_{xx} = 7,4$, кВт	
	$P_{вых}$, атм	$Q_{ЭКСП}$, м ³ /ч	$Q_{РАСЧ}$, м ³ /ч	$N_{ЭКСП}$, кВт	$N_{РАСЧ}$, кВт
$P_{вх} = 2$ атм	2,5	4,7	4,49	9,3	9,308
$P_{вх} = 3$, атм	3,0	5,04	5,16		
$P_{вх} = 4$, атм	3,5	5,06	5,11		

На основании проведенных исследований расход жидкости через РИА предлагается определять по формуле (3.2.10):

$$Q = Q_{полн} + f(\omega, R_p, \mu).$$

Опытные исследования по влиянию параметров R_p , μ и ω позволили определить вид функции $f(\omega, R_p, \mu)$, в которой коэффициентами учтена размерность расхода:

$$f(\omega R_p, \mu) = 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot \omega R_p^3 - 0,02 \cdot \omega R_p^2 + 0,25 \cdot \omega R_p + 3 \cdot d_{1,2}; \quad (3.2.12)$$

$$d_1 = 1 (\mu = 0,001 \div 0,03 \text{ Па} \cdot \text{с});$$

$$d_2 = 0,1 (\mu = 0,031 \div 0,07 \text{ Па} \cdot \text{с}).$$

На рис. 3.2.5. представлен график расчетных и экспериментальных зависимостей расхода жидкости от линейной скорости ротора ωR_p с диапазоном давления $P_{вх} = 0,2 - 0,4$, МПа на входе в РИА.

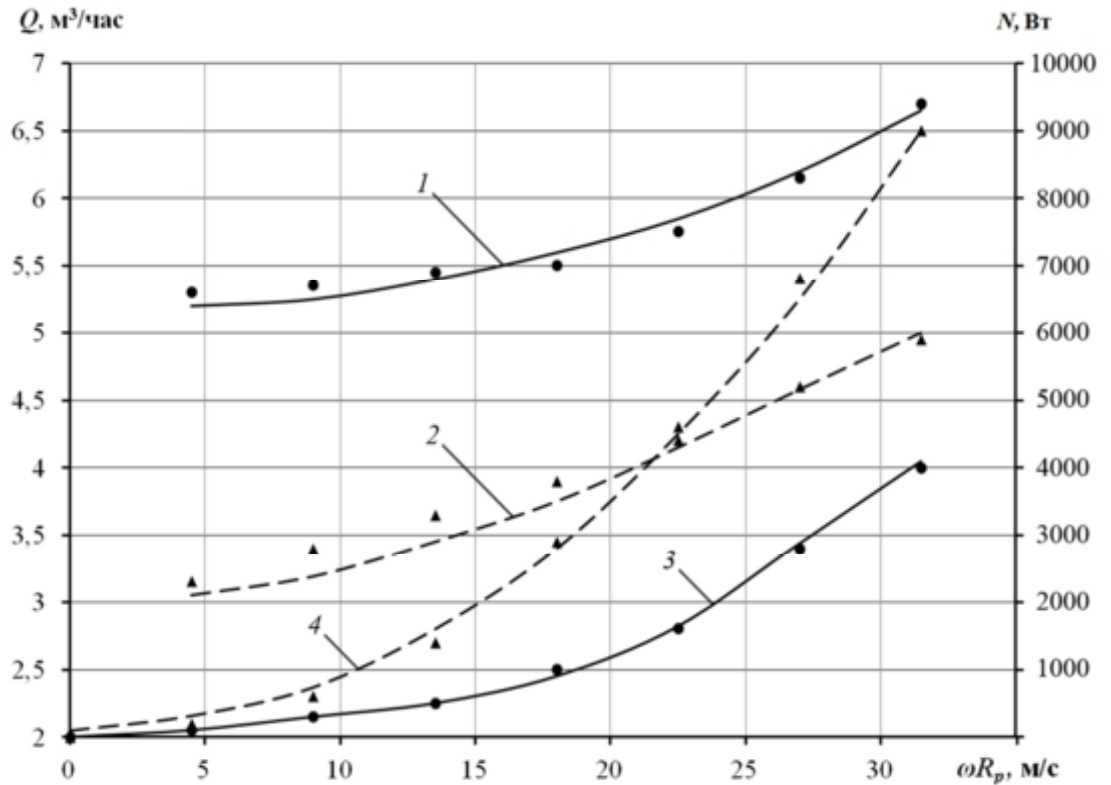


Рис.3.2.5. Зависимость расхода жидкости (кривые 1,2) и потребляемой мощности (кривые 3,4) от линейной скорости ротора:

1, 3 - вода ($\mu = 0,0018, \text{Па} \cdot \text{с}$, $\rho = 1000, \text{кг/м}^3$)

2, 4 - масло ($\mu = 0,059, \text{Па} \cdot \text{с}$, $\rho = 930, \text{кг/м}^3$).

Точки – экспериментальные данные, линии – расчет.

В соответствии с методом расчета потребляемой мощности, предложенным Промтовым М.А. [56], потребляемая мощность записывается в виде (3.2.13):

$$N = A \cdot \text{Re}^{-B} \cdot \left(\frac{\delta}{R_p} \right)^{0.2} \cdot \left(\frac{a \cdot z}{R_p} \right)^{0.7} \cdot \omega^3 \cdot \rho \cdot R_p^4 \cdot h_p, \quad (3.2.13)$$

где $A = k_1 \mu / \rho$; $B = k_2 \mu / \rho$; k_1, k_2 - эмпирические коэффициенты, преобразующие в безразмерный вид коэффициенты A и B .

Используя результаты расчета по формуле (3.2.13) и сопоставляя их с экспериментальными данными, были получены эмпирические коэффициенты, которые равны:

- для маловязких суспензий ($\mu = 0,001 \div 0,03 \text{ Па} \cdot \text{с}$) – $k_1 = 8,5 \cdot 10^9$, $k_2 = 3,6 \cdot 10^5$;

- для вязких суспензий ($\mu = 0,031 \div 0,07$ Па·с) – $k_1 = 2,24 \cdot 10^{10}$, $k_2 = 1,73 \cdot 10^4$.

Графики зависимости потребляемой мощности от линейной скорости совмещения канала ротора с каналом статора ωR_p показаны на рис. 3.3.2.

Анализ экспериментальных и расчетных данных с учетом эмпирических коэффициентов показывает их удовлетворительную сходимость. Погрешность расчета для расхода жидкости не превышает 8%, погрешность расчета для потребляемой мощности – 8%.

3.3. Статистическая обработка экспериментальных данных

Статистическая обработка экспериментально полученных данных проводилась по методике малых выборок с использованием коэффициента Стьюдента при доверительной вероятности 0,95 [111].

Среднее значение находили по формуле

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}. \quad (3.3.1)$$

Доверительный интервал измеряемой величины X рассчитывали по уравнению:

$$X_i = \bar{X} \pm t_{0,95} \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (3.3.2)$$

где $t_{0,95}$ – коэффициент Стьюдента; n – число параллельных измерений; S – стандартное отклонение отдельного результата, определяемое из соотношения.

Относительная погрешность рассчитана по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta X}{\bar{X}}, \quad (3.3.3)$$

где ΔX – относительная погрешность, а $\bar{X}$ – среднее значение.

Замеры концентрации ГК производились из трех образцов суспензии.

Замеры гидродинамических параметров производились не менее 20 раз.

3.4. Выводы по третьей главе

Для экспериментальных исследований был разработан многофункциональный испытательный стенд на базе РИА, на котором проводились исследования технологических характеристик аппарата, определение кинетических закономерностей, эмпирических коэффициентов процесса экстрагирования гуминовых кислот из биогумуса в РИА.

В результате экспериментальных исследований получены следующие результаты:

- введена поправочная функция для уточнения влияния вязкости жидкости и центробежных сил при течении жидкости в полости ротора без лопаток, а также для расчета расхода жидкости через аппарат $f(\omega, R_p, \mu)$;
- проведены эксперименты по определению влияния радиуса и угловой скорости ротора ω , вязкости жидкости μ на расходные характеристики и потребляемую мощность РИА, которые позволили определить вид функции $f(\omega, R_p, \mu)$ в формуле для определения расхода;
- определены эмпирические коэффициенты в формуле для расчета потребляемой мощности;
- определены коэффициенты в критериальном уравнении для расчета кинетических закономерностей процесса экстрагирования ГК из биогумуса в РИА.

Глава 4. Разработка оборудования и технологии экстрагирования гуминовых кислот и получения жидких гуминовых удобрений

4.1. Определение направлений повышения эффективности роторных импульсных аппаратов

Роторные гидромеханические аппараты, реализующие механическое и гидродинамическое воздействие на частицы гетерогенной среды, называются роторно-пульсационными аппаратами (РПА), гидродинамическими аппаратами роторного типа (ГАРТ), роторно-пульсационными гомогенизаторами (РПГ), насосами-гомогенизаторами (НГД), механо-акустическими роторными гомогенизаторами (МАГ), кавитационными аппаратами (КАП) и др. Роторные гидродинамические аппараты, в основу работы которых заложены гидродинамический и гидроакустический факторы воздействия, называются роторными импульсными аппаратами (РИА), роторными аппаратами с модуляцией потока (РАМП), гидродинамическими сиренами (СГД), роторными аппаратами физико-химических процессов (РАФ), роторно-пульсационными акустическими аппаратами (РПАА) и др. [2]. За рубежом аналогичные аппараты называются ULTRA-TURRAX, DISPAX-REACTOR (IKA, Германия), DISPERMAT (VMA-GETZMANN, Германия), YUMIX, GYDROMIX (NORMIT, Словакия), ROTOR-STATOR DISPERSER (Hockmeyer, США), VOTATOR CR MIXER (SPX, США), High shear dispersing emulsifier (FLUKO, Китай) и др.

В последнее время часто встречается название роторно-пульсационный аппарат (РПА), которым называют так же и РИА. РПА более эффективны для гетерогенных процессов с вязкими жидкостями и суспензиями с высокой концентрацией твердой фазы. РИА эффективен для маловязких систем «жидкость – жидкость» и «жидкость - твердое тело». Четкой границы по факторам воздействия между РПА и РИА нет, и подобное разделение носит условный характер. Основными признаками конструкции РПА является наличие нескольких последовательно установленных роторов и статоров (многоступенчатость), зазор

между статором и ротором одной ступени находится в пределах 0,1-1 мм. Характерным признаком для РИА является одна ступень (один ротор и статор), зазор при этом находится в пределах 0,05-0,1 мм. Так же особенностью РИА является большой шаг расположения каналов в статоре и роторе. Наиболее активная зона обработки среды в РПА находится в зазоре между статором и ротором (ступенями статора и ротора), в РИА – в каналах статора.

Одним из направлений повышения эффективности работы РИА является увеличение количества активных зон обработки среды в аппарате. Это достигается путём изменения конструктивных элементов аппарата, таких как: полость ротора, геометрия, расположение и количество каналов ротора и статора, величина зазора между ротором и статором, конструкция рабочей камеры аппарата, а также добавлением новых конструктивных элементов.

Основными направлениями повышения эффективности зон обработки в РИА является введение дополнительных турбулизирующих элементов в полости ротора, предназначенных для усиления гидродинамических и кавитационных явлений.

В патентах [113-125] описаны РИА, повышение эффективности работы которых достигается благодаря установленными на роторе или в его полости лопаток различной конфигурации. Лопатки обеспечивают изменение гидравлического режима движения, что создает необходимые условия для возникновения интенсивной гидродинамической кавитации, повышая тем самым эффективность работы устройства.

Другим направлением для повышения эффективности РИА является возможность регулировки зазора между ротором и статором, что обеспечивает развитие кавитации [126-127].

В патентах на полезные модели и изобретения [128-134] описаны РИА, повышение эффективности работы которых достигается благодаря измененной форме каналов и их числа. Каналы предложено размещать на боковых стенках в два ряда друг над другом, они могут быть выполнены в виде чередующихся друг

с другим глухих и сквозных отверстий, направлены навстречу потоку среды, иметь сужения и расширения.

Повышения эффективности работы РИА достигается установкой в конструкцию рабочей камеры аппарата дополнительных элементов [135-139]. К ним относятся гидродинамические кавитаторы в рабочей камере статора, регуляторы избыточного давления на выходном патрубке. Рабочая камера аппарата может содержать ультразвуковые магнитострикционные преобразователи для создания акустических колебаний в жидкой среде, насадки Вентури и Борда, образующие дополнительные области зарождения кавитационных пузырьков.

Одним из направлений повышения эффективности работы РИА является увеличение количества активных зон обработки жидкости в аппарате. Полость ротора редко рассматривается как основная рабочая зона, в которой жидкость подвергается обработке. Это обусловлено малыми значениями скорости потока жидкости в роторе по сравнению со скоростью потока жидкости в каналах ротора и статора или зазоре между ротором и статором. Тем не менее, конструктивное оформление полости ротора можно выполнить таким образом, чтобы жидкость проходила кавитационную и гидродинамическую обработку.

Важным направлением повышения эффективности работы аппарата является повышение его надежности и безостановочного ресурса работы. При обработке суспензий в РИА, одна из существенных проблем – это заклинивание ротора при налипании твердых частиц на рабочие поверхности ротора и статора. Для решения этой проблемы необходимы конструкции, которые позволяют регулировать зазор между ротором и статором без разборки аппарата, подбирать его величину для конкретного сырья без остановки аппарата.

4.2. Разработка оборудования и технологии экстрагирования гуминовых кислот для получения жидких гуминовых удобрений

На основе анализа рабочих зон разработана конструкция роторного импульсного аппарата [140], которая обеспечивает интенсивную обработку жидкости в полости ротора, предварительную подготовку обрабатываемой жидкости перед воздействием на нее в каналах ротора и статора, зазоре между ротором и статором. Схема предлагаемой конструкции РИА представлена на рис. 4.2.1 и рис. 4.2.2.

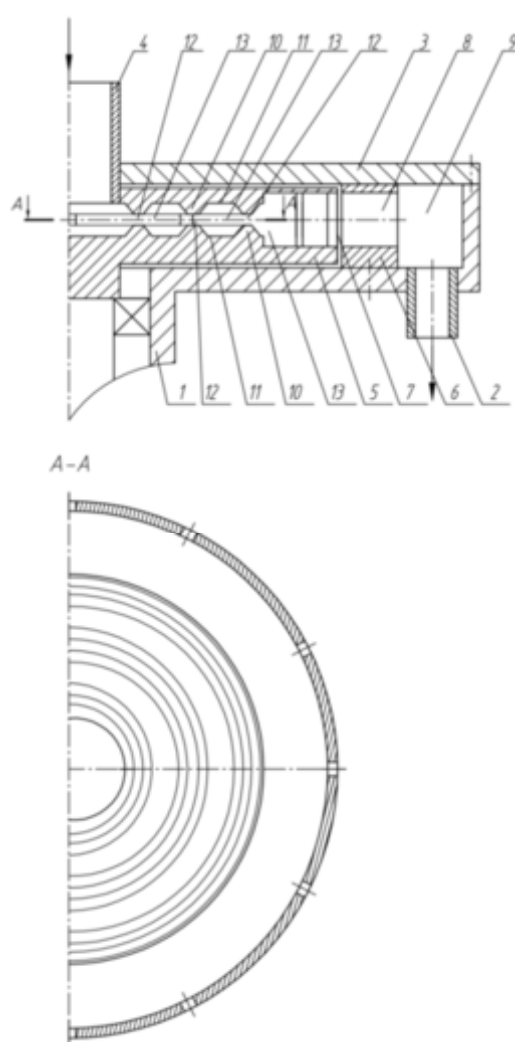


Рис. 4.2.1 Роторный импульсный аппарат переменным профилем сечения полости ротора.

РИА содержит корпус (1) с патрубком выхода среды (2), крышку (3) с патрубком входа среды (4), ротор (5), выполненный в форме полого диска, статор

(6), каналы (7) в боковой стенке ротора, каналы (8) в боковой стенке статора, камеру (9). В полости ротора (5), выполнены торообразные выступы (10) и впадины (11) на его внутренних дисковых поверхностях. Профиль радиального сечения внутренней поверхности крышки (3) и ротора (5) образует одно или несколько последовательных сужений (12) и расширений (13) проходного сечения по ходу потока жидкости в радиальном направлении. На фиг. 1 кромки выступов 10 выполнены острыми. Для снижения гидравлического сопротивления кромки выступов 10 могут быть сглаженными. Сужения 12 и расширения 13 могут образовывать один или несколько последовательных профилей, соответствующих профилю трубки Вентури (рис. 4.2.2).

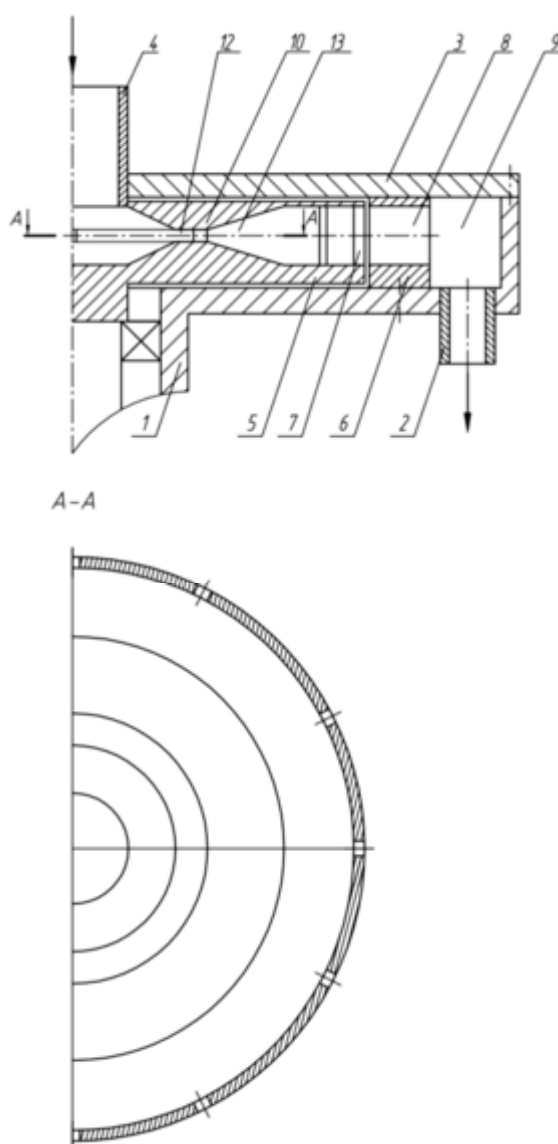


Рис. 4.2.2. Роторный импульсный аппарат с профилем сечения полости ротора в форме трубки Вентури.

Принцип работы РИА заключается в следующем. Обрабатываемая суспензия поступает под давлением через входной патрубок (4) в полость ротора, (5) попадает в торообразные сужения и расширения, образованные цилиндрическими выступами (10) и впадинами (11), проходит через каналы ротора (7) и статора (8) и попадает в камеру (9), а затем выводится из аппарата через патрубок (2).

При вращении ротора (5) его каналы (7) периодически совмещаются с каналами (8) статора (6). В период времени, когда каналы ротора перекрыты стенкой статора, в полости ротора давление возрастает, а при совмещении канала ротора с каналом статора давление за короткий промежуток времени сбрасывается и в результате этого в канал статора распространяется импульс давления. При распространении импульса избыточного давления в канале статора, за ним возникает область пониженного давления, так как совмещение каналов ротора и статора завершилось, и подача жидкости в канал статора происходит только за счет транзитного течения из зазора между ротором и статором. Объем жидкости, попавший в канал статора, стремится к выходу из канала, и силы инерции создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию. Жидкость подвергается воздействию импульсов давления, способствующих интенсификации физико-химических процессов.

Движение жидкости в роторе от центральной оси до каналов в боковой стенке ротора обеспечивается за счет внешнего давления и центробежных сил. При прохождении жидкости в радиальном направлении через торообразное сужение и расширение давление по ходу потока жидкости в сужении уменьшается в соответствии с законом Бернулли, а в расширении возрастает. Изменение давления и скорости по ходу движения жидкости в полости ротора аналогично изменению скорости и давления в трубе при местном сужении, но этот процесс происходит по радиальному направлению от центральной оси ротора до его внутренней боковой стенки. Пульсации давления и скорости потока в радиальном направлении при движении жидкости в роторе вызывают вихреобразования и кавитацию в полости ротора. Интенсивная

гидродинамическая обработка жидкости внутри полости ротора повышает эффективность обработки жидкости в роторном импульсном аппарате.

Вариант исполнения профиля радиального сечения внутренней полости ротора в форме одного или нескольких последовательных профилей трубки Вентури повысит эффективность работы роторного импульсного аппарата как генератора вихрей и кавитации, так как трубка Вентури генерирует срыв вихрей и пульсаций давления. Эффективность развития кавитации при прохождении жидкости с закономерностями изменения давления и скорости потока как это происходит при движении жидкости в трубке Вентури, значительно выше по сравнению с потоком, проходящим через профиль постоянного сечения. Профиль трубки Вентури широко применяется в технике и технологиях для создания кавитации в проходящем потоке жидкости. Расчет полей давления с помощью программного комплекса ANSYS CFX позволяет подобрать геометрические и режимные параметры РИА для профиля радиального сечения внутренней полости ротора в форме профиля последовательных сужений и расширений или профиля сечения трубки Вентури при оптимальных значениях числа кавитации, определяемого по формуле [81, 110]:

$$C = \frac{2(P_{\text{вых}} - P_{\text{нас. пара}})}{\rho \cdot V_{\text{вых}}^2}, \quad (4.2.1)$$

где $P_{\text{вых}}$ – давление на выходе из диффузора сужения или профиля сечения в форме трубки Вентури, $P_{\text{нас. пара}}$ – давление насыщенных водяных паров при температуре 25° С ($P_{\text{нас. пара}} = 3167$ Па), $V_{\text{вых}}$ – скорость потока жидкости на выходе из сужения или сопла трубки Вентури.

Пример расчета полей давления внутренней полости ротора в форме профиля последовательных сужений и расширений показан на рис. 4.2.3. На рис. 4.2.4 приведен пример расчета внутренней полости ротора в форме профиля трубки Вентури. На рисунке 4.2.5. приведен пример расчета векторов скорости потока во внутренней полости ротора. При расчете полей давления и скорости потока жидкости учитывалось действие центробежных сил на жидкость и не учитывались пульсации давления и скорости потока при совмещении каналов

ротора и статора, так как они не имеют большую амплитуду и демпфируются потоком жидкости, нагнетаемым внешним насосом под давлением. Новая конструкция РИА с внутренней полостью ротора в форме профиля последовательных сужений и расширений для процесса экстрагирования защищена патентом РФ на полезную модель № 147138 (Приложение 9).

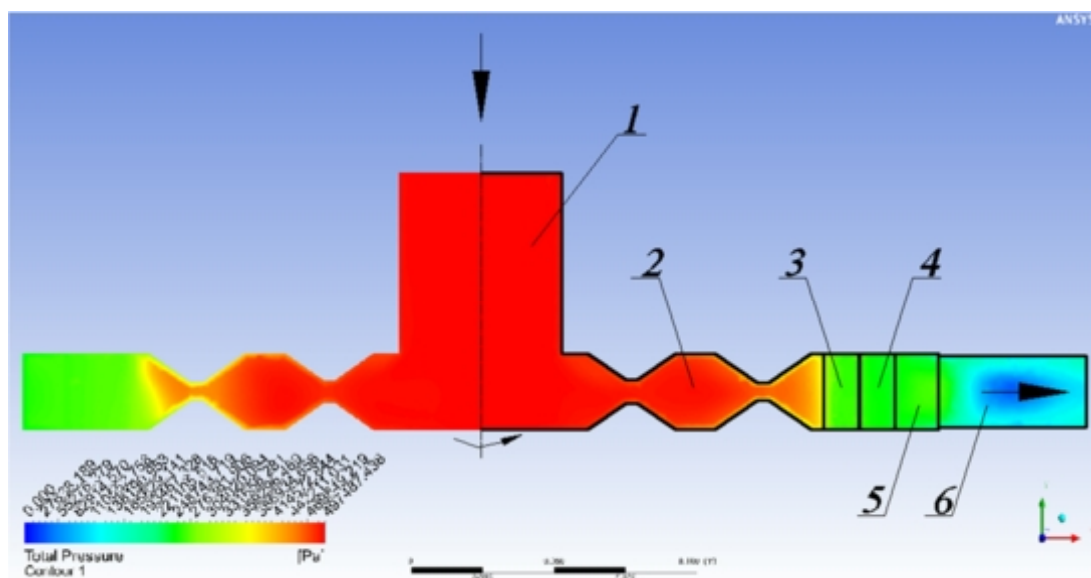


Рис. 4.2.3. Пример расчета поля давления во внутренней полости ротора.

1 – входной патрубок; 2 – полость ротора; 3 – канал ротора; 4 – канал статора; 5 – рабочая камера; 6 – выходной патрубок.

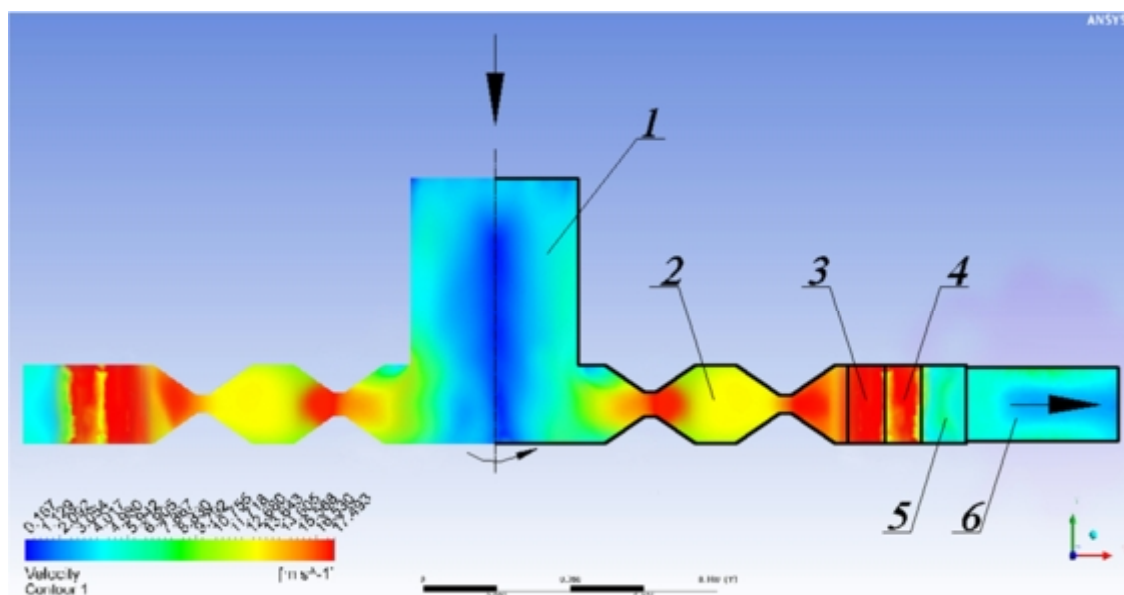


Рис. 4.2.4. Пример расчета скорости потока во внутренней полости ротора.

1 – входной патрубок; 2 – полость ротора; 3 – канал ротора; 4 – канал статора; 5 – рабочая камера; 6 – выходной патрубок.

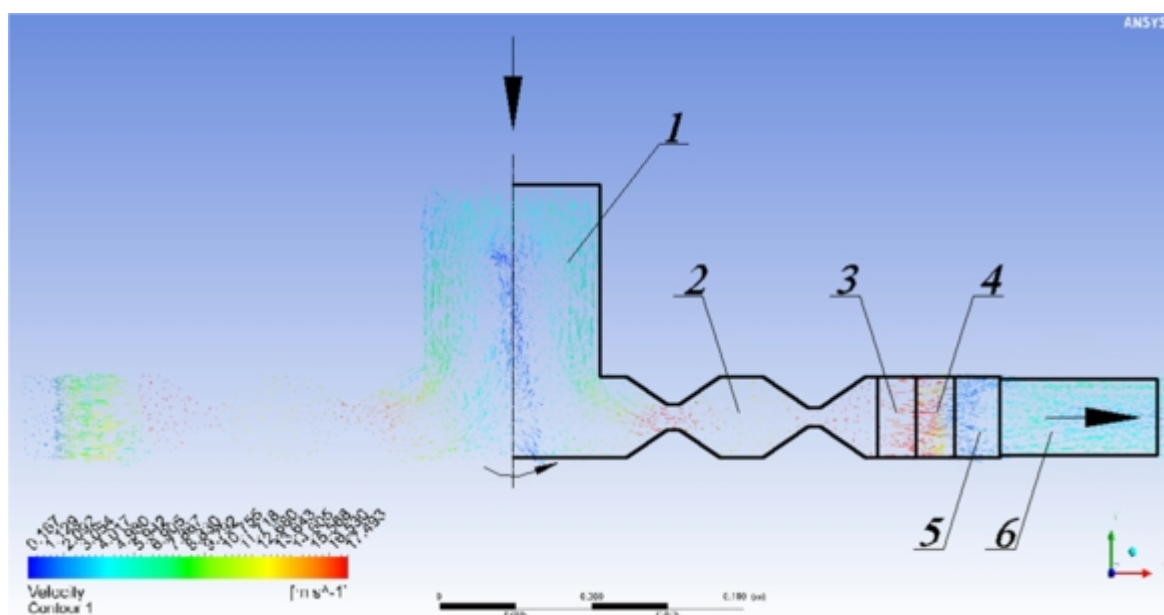


Рис. 4.2.5. Пример расчета векторов скорости потока во внутренней полости ротора.

1 – входной патрубок; 2 – полость ротора; 3 – канал ротора; 4 – канал статора; 5 – рабочая камера; 6 – выходной патрубок.

Одним из основных параметров, позволяющих повысить амплитуду импульсного давления, энергию и интенсивность импульса давления, является зазор между ротором и статором. В процессе работы РИА происходит износ рабочих поверхностей ротора и статора, зазор между ними увеличивается, и эффективность работы аппарата снижается. В РИА радиального типа рабочие поверхности цилиндрических роторов и статоров выполняют коническими. Зазор между боковыми рабочими поверхностями ротора и статора изменяют, как правило, осевым перемещением статора, реже ротора. Так как поверхности ротора и статора рекомендуется делать коническими с углом наклона образующей конуса 5-10 градусов (максимально 45 градусов), то для небольшого изменения величины зазора необходимо сдвигать статор или ротор на значительно большее значение.

Более простой и надежный вариант конструкции РИА с регулируемым зазором – это исполнение конструкции ротора и статора в форме дисков, то есть РИА осевого типа. Такая конструкция аппарата позволяет эффективно и надежно

обрабатывать суспензии, например жидких органических удобрений из биогумуса или торфа, достаточно легко и без разборки аппарата устанавливать необходимый зазор для конкретного типа сырья. По мере износа рабочих поверхностей ротора и статора можно уменьшать зазор между ротором и статором не только без разборки аппарата, но и без его остановки.

На рис. 4.2.6. изображен роторный импульсный аппарат осевого типа нашей конструкции с регулируемым зазором [141]. Роторный импульсный аппарат содержит корпус 1, в котором установлен подшипниковый узел с валом 2. На валу 2 установлен ротор 3 в форме диска, в котором выполнены каналы 4. К корпусу 1 прикреплена крышка 5, в которой установлен статор 6 в форме диска, имеющий каналы 7. В крышке 5 установлен патрубок 8 для выхода обрабатываемой жидкости, в корпусе 1 – патрубок 9 для входа обрабатываемой жидкости.

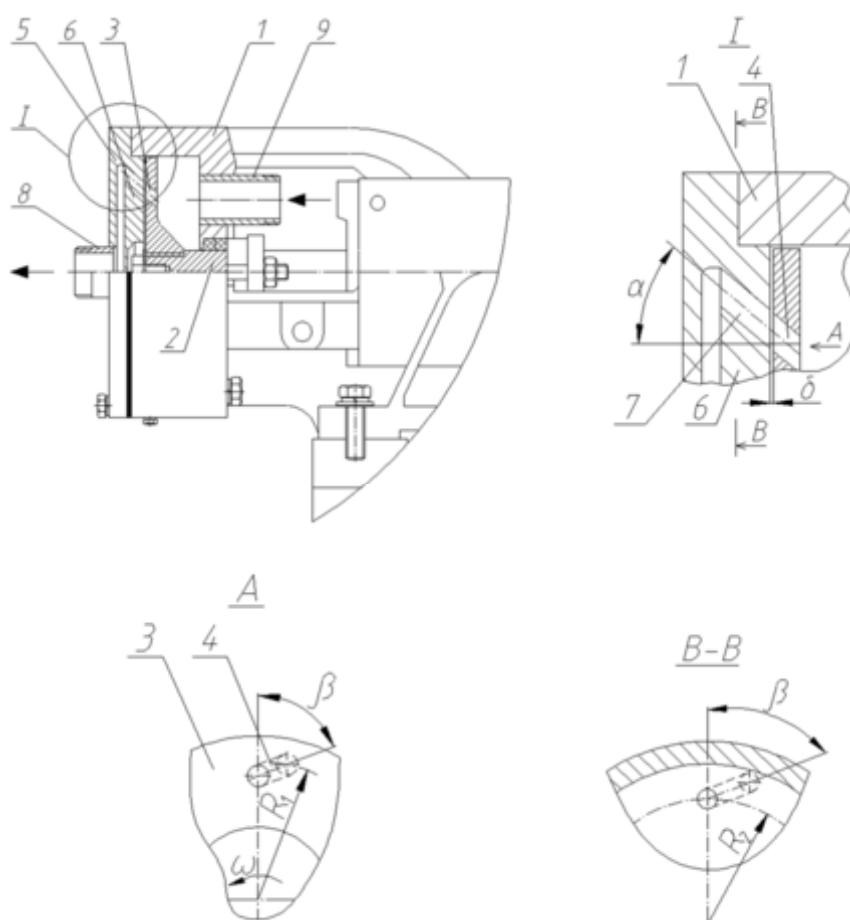


Рис. 4.2.6. Роторный импульсный аппарат осевого типа с регулируемым зазором.

Пример расчета полей скорости внутренней полости РИА осевого типа с регулируемым зазором показан на рис. 4.2.7.

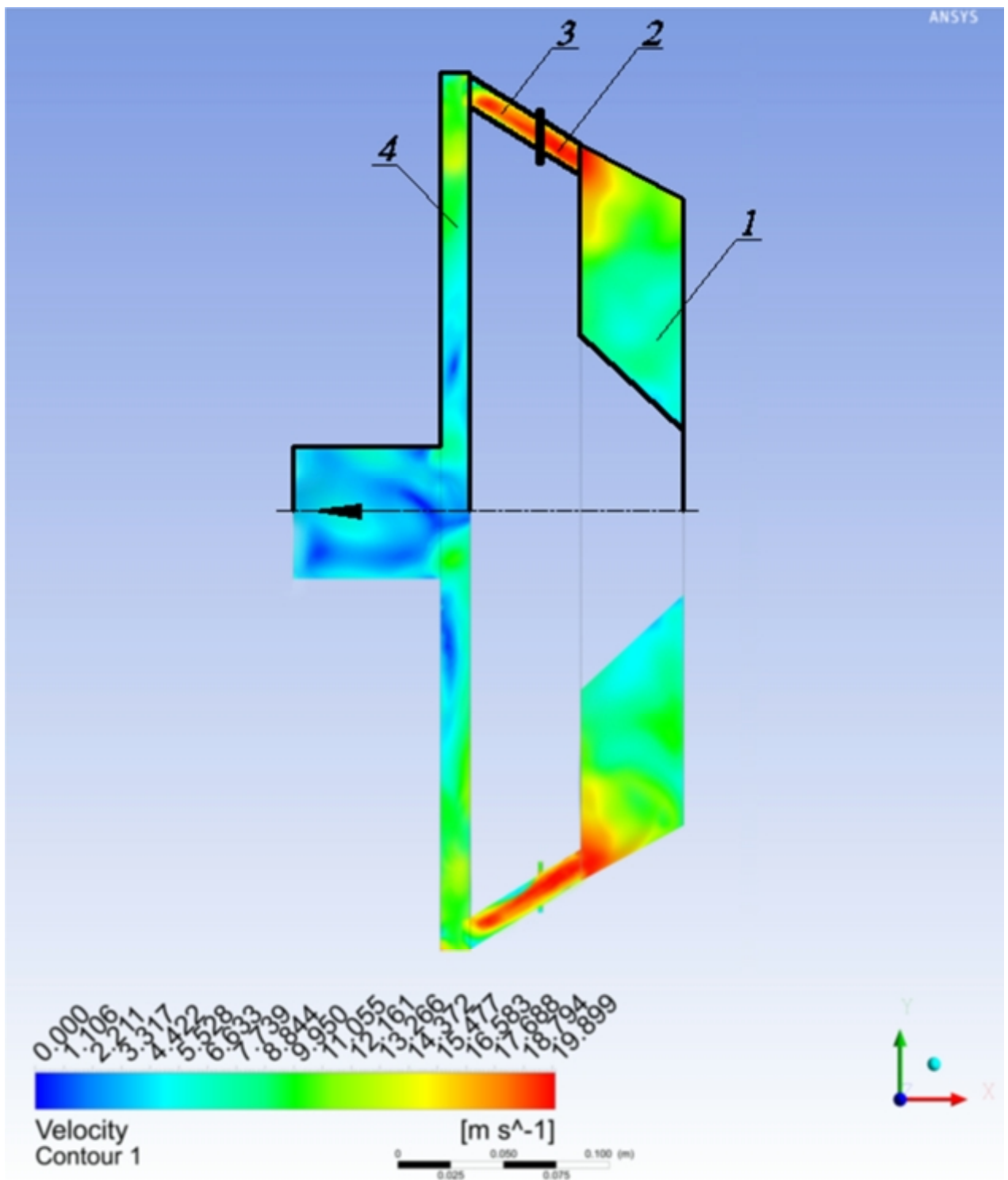


Рис. 4.2.7. Пример расчета скорости потока во внутренней полости РИА осевого типа с регулируемым зазором.

1 – полость ротора; 2 – канал ротора; 3 – канал статора; 4 – рабочая камера.

Принцип работы РИА заключается в следующем. Обрабатываемая суспензия поступает под давлением во входной патрубок (9), проходит через каналы ротора (4), каналы статора (7) и выводится из аппарата через патрубок (8). При вращении ротора (3) его каналы (4) совмещаются с каналами (7) статора (6). В момент времени, когда каналы ротора перекрыты статором, в полости ротора возрастает давление, а при совмещении каналов, давление сбрасывается за малый промежуток времени, в результате чего импульс давления распространяется в канал статора. В канале статора при распространении импульса избыточного давления за ним возникает область пониженного давления, так как совмещение каналов ротора и статора завершилось, и подача жидкости в канал статора происходит только за счет транзитного течения из зазора между ротором и статором. Объем жидкости, попавший в канал статора, стремится к выходу из канала, и силы инерции создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию. Жидкость подвергается воздействию импульсов давления, способствующих интенсификации физико-химических процессов.

Для снижения гидравлического сопротивления потока жидкости, выходящего из канала ротора, и входящего в канал статора в момент их полного совмещения, необходимо поток жидкости точно направить вдоль линии, которая является продолжением оси канала ротора и совпадает с осью канала статора. Для этого необходимо, чтобы центральная ось каналов статора, была бы отклонена от центральной оси дисков статора и ротора на такой же угол α , что и каналы ротора, величина которого выбирается из условия $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, а также была бы отклонена в сторону, противоположную направлению вращения, от радиального луча, перпендикулярного центральной оси дисков статора и ротора, на такой же угол β , что и каналы ротора, величина которого выбирается из условия $0^\circ < \beta < 90^\circ$.

Исполнение каналов статора с наклоном под углом α к центральной оси ротора и с наклоном в сторону, противоположную направлению вращения, под углом β к радиальному лучу, перпендикулярному центральной оси ротора, способствует снижению гидравлического сопротивления при течении жидкости

через канал статора за счет уменьшения гидродинамических сил, препятствующих ее продвижению из канала ротора в канал статора.

При исполнении каналов статора под углом α к центральной оси диска статора, необходимо точно позиционировать расположение каналов статора на диске статора относительно выходных участков каналов в роторе, чтобы исключить смещение центральных осей каналов статора относительно центральных осей каналов ротора за счет наличия зазора между дисками ротора и статора. Для этого, точки пересечения центральных осей каналов статора с поверхностью диска статора, ближней к диску ротора, необходимо располагать на окружности радиусом R_2 , который определяется по формуле $R_2 = R_1 + \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha$, где R_1 – радиус окружности точек пересечения центральных осей каналов ротора с поверхностью диска ротора, ближней к диску статора, δ – величина зазора между ротором и статором.

Преимуществом РИА осевого типа является возможность достаточно легкого и удобного регулирования величины зазора между ротором и статором, очистки рабочих поверхностей ротора и статора без разборки аппарата. К недостаткам следует отнести действие центробежных сил на поток жидкости, входящий в канал ротора перпендикулярно основной движущей силе – перепаду давления между входом и выходом. Это создает дополнительное гидравлическое сопротивление, которое снижает эффективность работы аппарата. Для РИА осевого типа не рекомендуется делать ротор диаметром более 100 – 150 мм и частоту вращения ротора более 3000 об/мин.

Разработанная конструкция РИА осевого типа с регулируемым зазором для процесса экстрагирования защищена патентом РФ на полезную модель № 130877 (Приложение 10).

4.3. Разработка технологии получения и обеззараживания жидких гуминовых удобрений в роторном импульсном аппарате

Технологическая схема установки для получения и обеззараживания гуминовых удобрений представлена на рисунке 4.3.1.

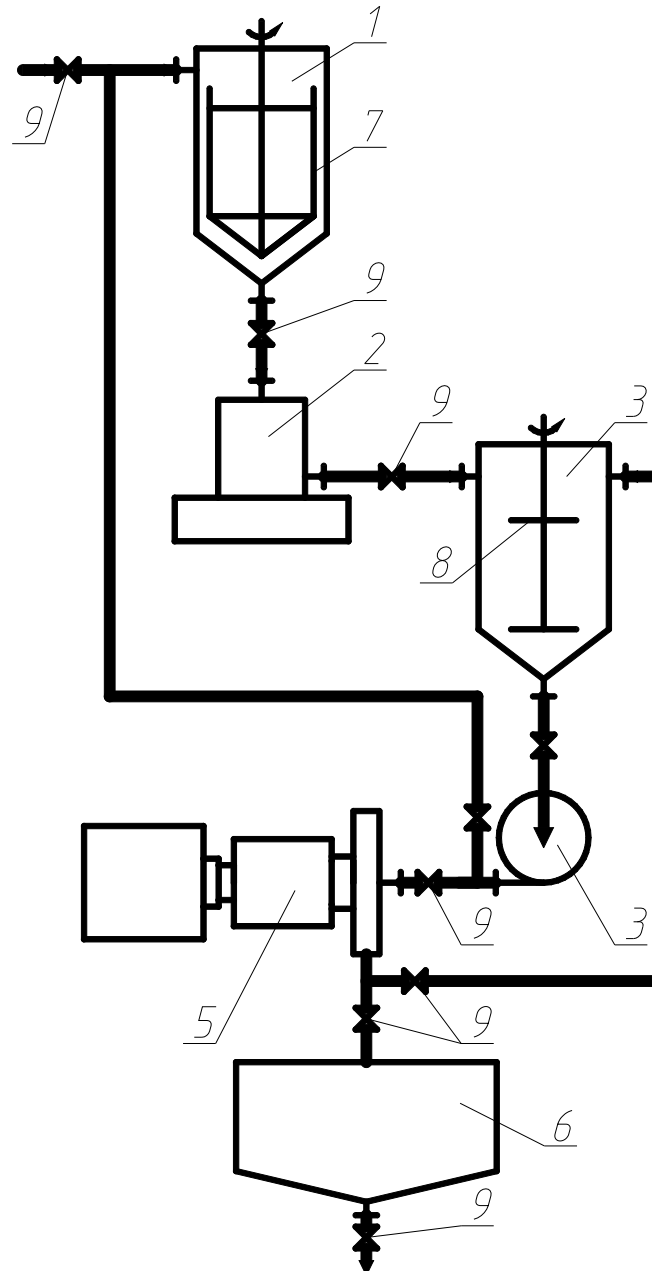


Рис. 4.3.1. Технологическая схема установки для получения и обеззараживания гуминовых удобрений.

1 – емкости исходной суспензии; 2 – истирающая мельница; 3 – промежуточная емкость; 4 – насос; 5 – роторный импульсный аппарат; 6 – емкость готового продукта; 7 – рамная мешалка; 8 – ленточная лопастная мешалка; 9 – вентили.

Установка содержит емкость исходной суспензии (1), соединенная своим выходным патрубком с входным патрубком мельницы предварительного помола частиц суспензии (2), соединенной выходным патрубком с входным патрубком промежуточной емкости (3), выходной патрубок которой соединен с входным патрубком насоса (4). Выходной патрубок насоса (4) соединен с входными патрубками емкости исходной суспензии (1) и экстрактора биологически активных веществ (роторным импульсным аппаратом) (5). Выходной патрубок экстрактора биологически активных веществ (РИА) (5) соединен с входным патрубком емкости готового продукта (6).

В емкости исходной суспензии (1) установлена рамная мешалка (7). В промежуточной емкости (3) установлена ленточная лопастная мешалка 8. Для направления и регулирования потоков в гидравлической системе установлены вентили (9). В качестве мельницы предварительного помола (2) применяется истирающая мельница. В качестве экстрактора биологически активных веществ (5) используется РИА.

Принцип работы установки заключается в следующем. Суспензия гуматосодержащего сырья, например биогумуса, с необходимой концентрацией твердой фазы поступает в емкость исходной суспензии (1), где смешивается рамной мешалкой (7) для создания однородности. Затем грубодисперсная суспензия поступает в мельницу предварительного помола (2), где происходит первичное измельчение частиц суспензии. Частицы крупной фракции подвергаются предварительному дроблению. Далее, из мельницы, суспензия самотеком поступает в емкость (3), где происходит ее перемешивание и предварительная гомогенизация по объему ленточной лопастной мешалкой (8). При наличии недостаточно измельченных частиц крупной фракции, суспензия перекачивается насосом (4) в емкость (1), и поступает на повторное измельчение в мельницу (2). Затем из емкости (3) суспензия перекачивается насосом (4) в экстрактор биологически активных веществ - РИА (5), в котором суспензия подвергается многофакторному воздействию механического, акустического и теплового характера.

Данные виды воздействия способствуют увеличению поверхности фазового контакта, уменьшению величины диффузионного слоя и увеличению относительных скоростей движения фаз. Дискретное, сконцентрированное и локализованное многофакторное воздействие роторного импульсного аппарата существенно интенсифицирует процесс массопереноса биоактивных веществ из твердых частиц биогумуса в жидкость за счет большой удельной диссипации энергии в малом объеме за малый интервал времени.

Циклическая обработка суспензии в РИА используется для повышения эффективности процесса экстрагирования биоактивных веществ из частиц суспензии. При этом суспензия из экстрактора биологически активных веществ подается под давлением в промежуточную емкость, а затем направляется на повторную обработку в экстрактор.

После достаточного числа циклов обработки в роторном импульсном аппарате, готовая суспензия биогумуса накапливается в емкости готового продукта (6). По критерию достижения требуемой концентрации биоактивных веществ в воде эмпирически определяется достаточное число циклов обработки суспензии.

Принципиальная схема установки по производству жидких гуминовых удобрений из биогумуса и рекомендации по приготовлению водной дисперсии биогумуса – приняты к внедрению в ООО «Биогумус». (Приложение 11)

Отработка технологии проводилась на стенде, описанном в главе 3. Фракционный состав сухого биогумуса определяли с использованием вибрационного грохота “Вибротехник ВП-Т/22С”. В качестве просеивающих элементов использовались листовые сита, с размером ячеек квадратной формы 2, 1.5, 1, 0.5, 0.25 мм. Фракция, размерами более 2.4 мм предварительно отсеивалась и не использовалась в дальнейших экспериментальных исследованиях. Процесс разделения частиц сыпучего биогумуса производили в течение 20 минут, с массой исходного сухого биогумуса 1 кг. После остановки вибрационного грохота каждое сито, вместе с остаточной фракцией было взвешено и определено процентное соотношение его содержимого.

Кривые распределения фракционного состава исходного и измельченного биогумуса показаны на рис. 4.3.2.а и 4.3.2.б. По результатам анализа фракционного состава исходного биогумуса, в основной массе частиц (78% масс.) преобладают частицы среднего диаметра, размерами более 0,25 мм – и менее 2 мм.

Средний диаметр частиц исходного биогумуса:

$0 < d_{cp} \leq 0,25$ мм – 16,4%;

$0,25 < d_{cp} \leq 0,5$ мм – 25,05%;

$0,5 < d_{cp} \leq 1$ мм – 23,7%;

$1 < d_{cp} \leq 1,5$ мм – 29,5 %;

$1,5 < d_{cp} \leq 2$ мм – 2,15%;

$2 < d_{cp} \leq 2,4$ мм – 3,3%.

Фракционный состав измельченных частиц биогумуса был определён на лазерном анализаторе частиц «Micro Sizer 201C».

Средний размер частиц фракций суспензии биогумуса, обработанной в РИА:

15% частиц имеют средний диаметр до 1 мкм,

65% частиц имеют средний диаметр от 1 до 5 мкм,

20% частиц имеют средний диаметр от 5 до 25 мкм,

5% частиц имеют средний диаметр свыше 100 мкм.

Экстрагирование гуминовых кислот из биогумуса проводилось при температуре 20°C, в установке на базе РИА, а также в емкостном аппарате с ленточной мешалкой. Опыты проводились при различной интенсивности обработки, которая регулировалась изменением частоты вращения ротора. Интенсивность обработки для РИА и для ленточной мешалки, можно охарактеризовать по произведению $\omega \cdot R$, где ω – частота вращения вала ротора РИА или ленточной мешалки, R – радиус ротора или радиус лопасти ленточной мешалки. При приготовлении водной суспензии биогумуса с использованием ленточной мешалки, проводили эксперимент как с добавлением 1% щелочи, так и без щелочи. Соотношение компонентов суспензии биогумуса: 20% биогумус +

80% вода или водный щелочной раствор. Перемешивание осуществляли с помощью лопастной мешалки в течение 60 секунд и исследовали на кинетику образования осадка.

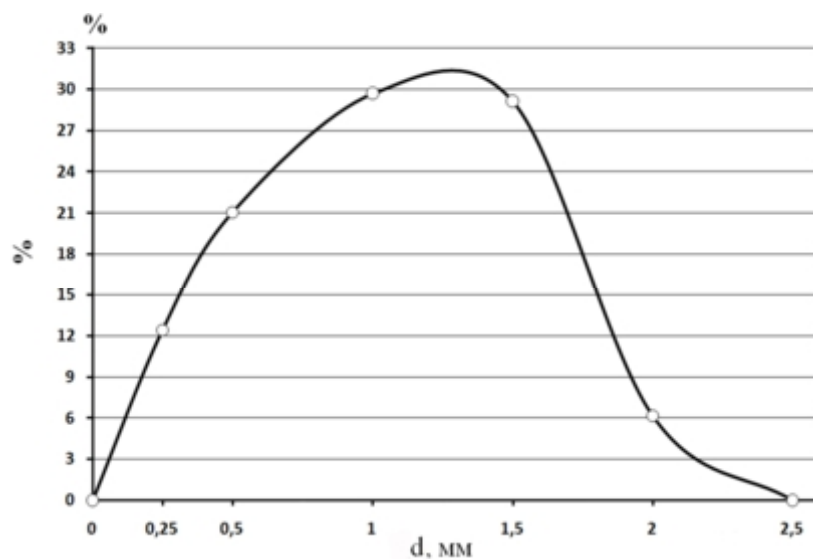


Рис. 4.3.2.а. Кривые распределения фракционного состава частиц исходного биогумуса.

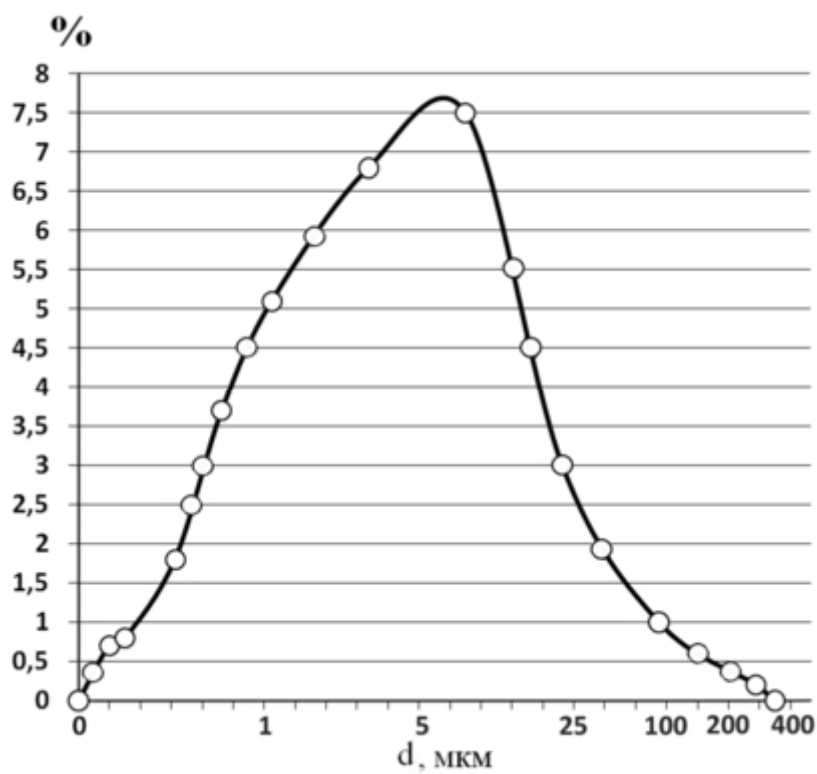


Рис. 4.3.2.б. Кривые распределения фракционного состава обработанного в РИА биогумуса.

Обработку суспензии проводили в течение 60 секунд, при различной, для каждого опыта, скорости вращения ротора. Скорость совмещения каналов ротора и статора устанавливали $\omega R_p = 13$ м/с, $\omega R_p = 26$ м/с и $\omega R_p = 39$ м/с. Для предварительного перемешивания суспензию обрабатывали без кавитации, пропустив весь объем суспензии через РИА, при слабой подаче насоса и скорости $\omega R_p \sim 1$ м/с.

Образцы суспензии биогумуса были исследованы на устойчивость к расслоению в течение 8 суток. Для этого 100 мл суспензии каждого образца наливали в мензурки, и наблюдали за выделением воды в верхней части мензурок. В нижней части мензурок находилась суспензия, содержащая грубодисперсные частицы биогумуса. Между двумя слоями суспензии обозначилась чёткая граница раздела фаз.

По результатам наблюдений процесса расслоения суспензии биогумуса из 6-ти образцов построены графики, показанные на рис. 4.3.3 и рис. 4.3.4. При разных параметрах обработки среды, доля выделившейся воды в образцах – меняется.

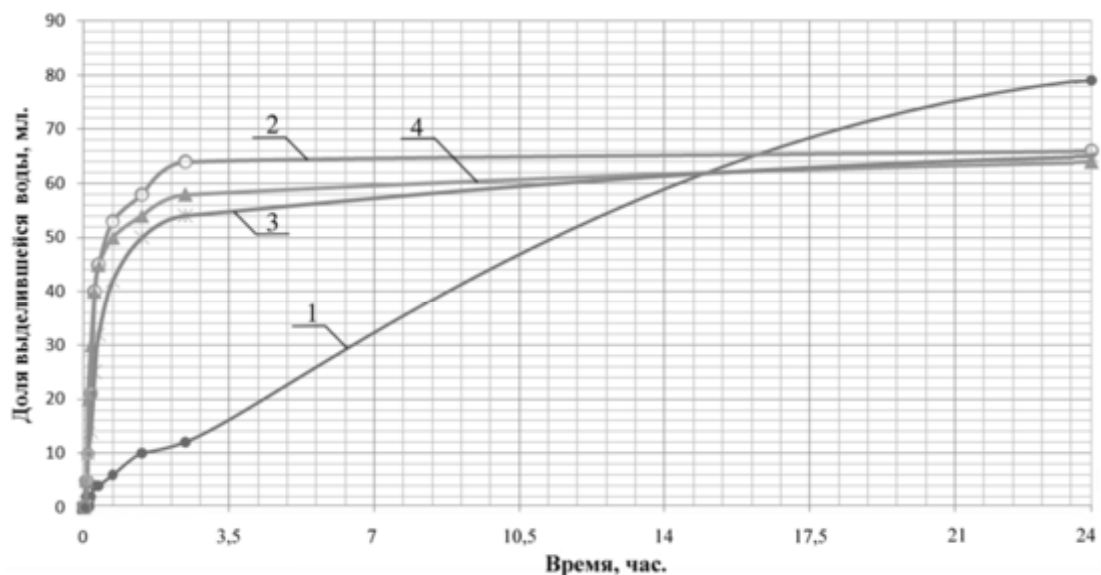


Рис. 4.3.3. Графики процесса выделения воды в суспензии биогумуса, обработанной в аппаратах:

- 1 – емкость с ленточной мешалкой ($\omega R_m = 0,8$ м/с); 2 – РИА, ($\omega R = 13$ м/с);
3 – РИА ($\omega R = 26$ м/с); 4 – РИА ($\omega R = 39$ м/с).

На рис. 4.3.4 представлен график осаждения биогумуса, обработанного в РИА, при различных скоростях вращения ротора, и ёмкости с ленточной мешалкой в период времени 204 часа (продолжение графиков на рис. 4.3.3).

Расслоение суспензии биогумуса, обработанной в аппарате с ленточной мешалкой, происходит медленнее по сравнению с суспензией, обработанной в РИА, зато с большим образованием осадка. Отсюда можно сделать вывод, что использование аппарата с ленточной мешалкой для приготовления водной дисперсии биогумуса менее эффективно, по сравнению с РИА.

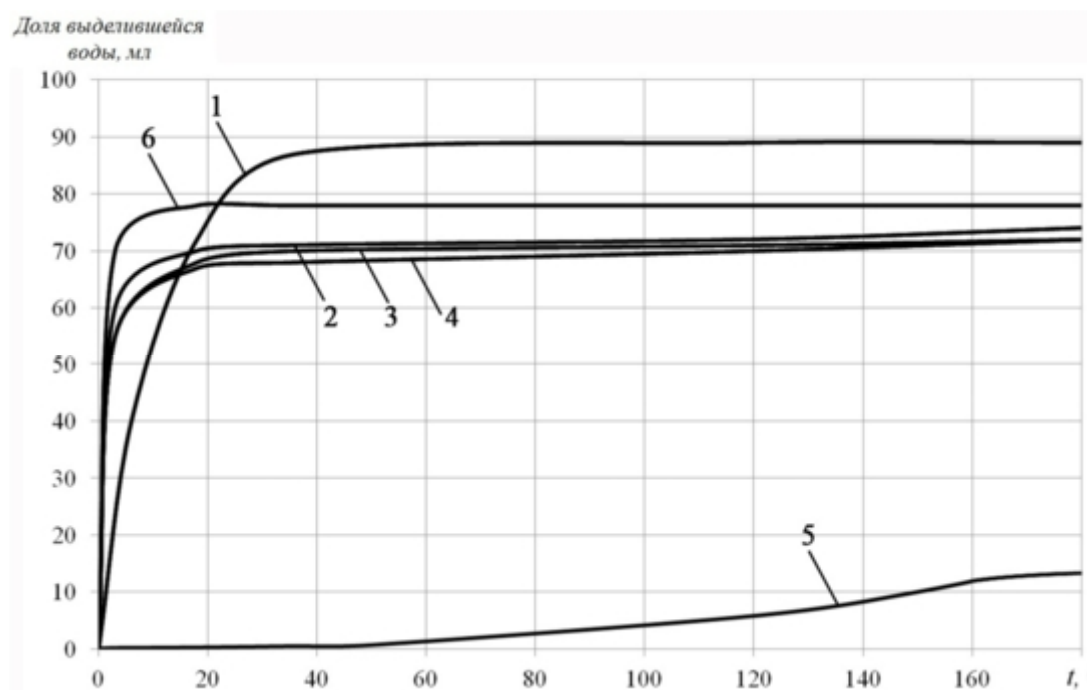


Рис. 4.3.4. Графики процесса выделения воды в суспензии биогумуса, обработанной в аппаратах:

- 1 – ёмкость с ленточной мешалкой ($\omega R_m = 0,8$ м/с);
- 2 – РИА, ($\omega R = 13$ м/с); 3 – РИА ($\omega R = 26$ м/с);
- 4 – РИА ($\omega R = 39$ м/с); 5 – РИА ($\omega R = 39$ м/с) (вода – щелочной р-р);
- 6 – ёмкость с ленточной мешалкой ($\omega R_m = 0,8$ м/с) (вода–щелочной р-р).

На рис. 4.3.4 представлен график выделения воды из суспензии биогумуса за период времени 192 часа (8 суток). В течение этого времени начинают выпадать в осадок частицы в пробах суспензии, в которую был добавлен

гидроксид калия (KOH). Водно-щелочной раствор использовали для усиления процесса извлечения из суспензии гуминовых кислот.

В случае, когда в обрабатываемую суспензию биогазуса добавлена щёлочь (гидроксид калия), в количестве 1% масс., расслоение происходит заметно медленнее и явное выпадение осадка происходит лишь после 4 суток отстаивания, что показано на графике 5.

Полученные в ходе эксперимента образцы суспензии биогазуса были направлены на лабораторный анализ, с целью установления концентрации экстрагированных гуминовых кислот.

На рисунке 4.3.5 представлена диаграмма лабораторного анализа результатов эксперимента.

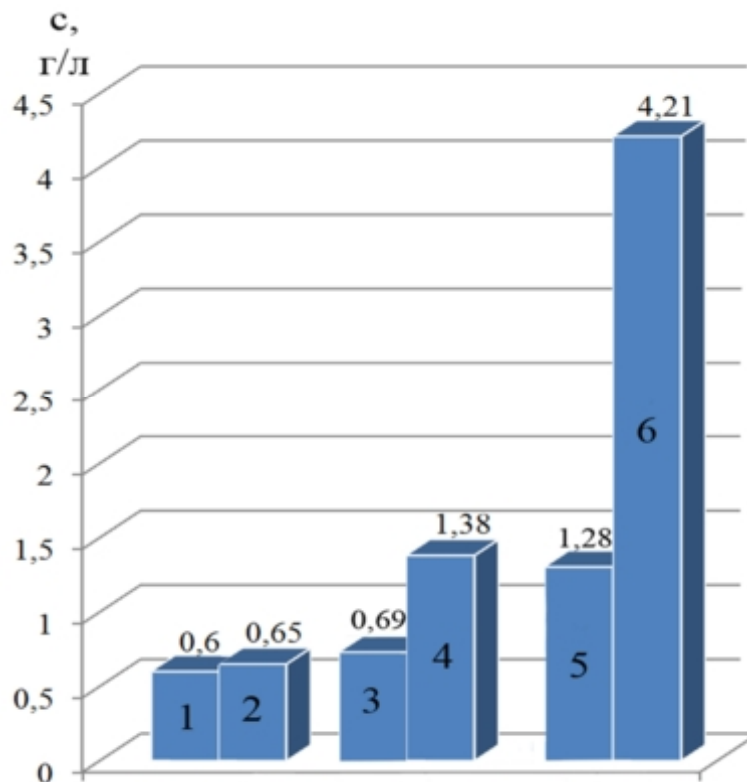


Рис. 4.3.5. Концентрация гуминовых кислот в воде при обработке 20%-ной суспензии биогазуса:

1,2 – обработка в ёмкостном аппарате с ленточной мешалкой.

1 – $\text{pH} = 7,5$; $\omega R_m = 0,8$ м/с; 2 – $\text{pH} = 12,6$; $\omega R_m = 0,8$ м/с;

3,4,5,6 – обработка в роторном импульсном аппарате РИА-250.

3 – $\text{pH} = 7,6$; $\omega R = 13$ м/с; 4 – $\text{pH} = 12,5$; $\omega R = 13$ м/с; 5 – $\text{pH} = 7,6$;

$\omega R = 39$ м/с; 6 – $\text{pH} = 12,5$; $\omega R = 39$ м/с.

Вода имела $\text{pH}=7.5 - 7.6$, водно-щелочной раствор имел $\text{pH}=12.5 - 12.6$. В щелочной среде, по сравнению с нейтральной, процесс экстракции гуминовых кислот из биогумуса происходит интенсивнее. В присутствии экстрагента концентрация составляет 4,21 г/л, что в 6 раз выше, по сравнению с обработкой в емкости с ленточной мешалкой.

При обработке частиц биогумуса в РИА, без щёлочи, концентрация гуминовых кислот в воде в 2 раза выше, по сравнению с ленточной мешалкой. Концентрация гуминовых кислот, содержащаяся в водном растворе 20%-ной суспензии биогумуса определялось в испытательной лаборатории ФГУ Государственный центр агрохимической службы «Тамбовский» (Приложение 12).

На рис. 4.3.6 – рис. 4.3.7 представлены фотографии образцов пробы водной суспензии биогумуса, обработанной в РИА при скорости $\omega R_p = 26$ м/с.

Расслоение начинает происходить, уже спустя 4 минуты после проведения эксперимента и составляет 3 мл выделившейся воды от исходных 100 мл. На рис. 4.3.8 представлен график изменения средних размер частиц биогумуса в зависимости от количества циклов обработки суспензии в РИА в РИА.

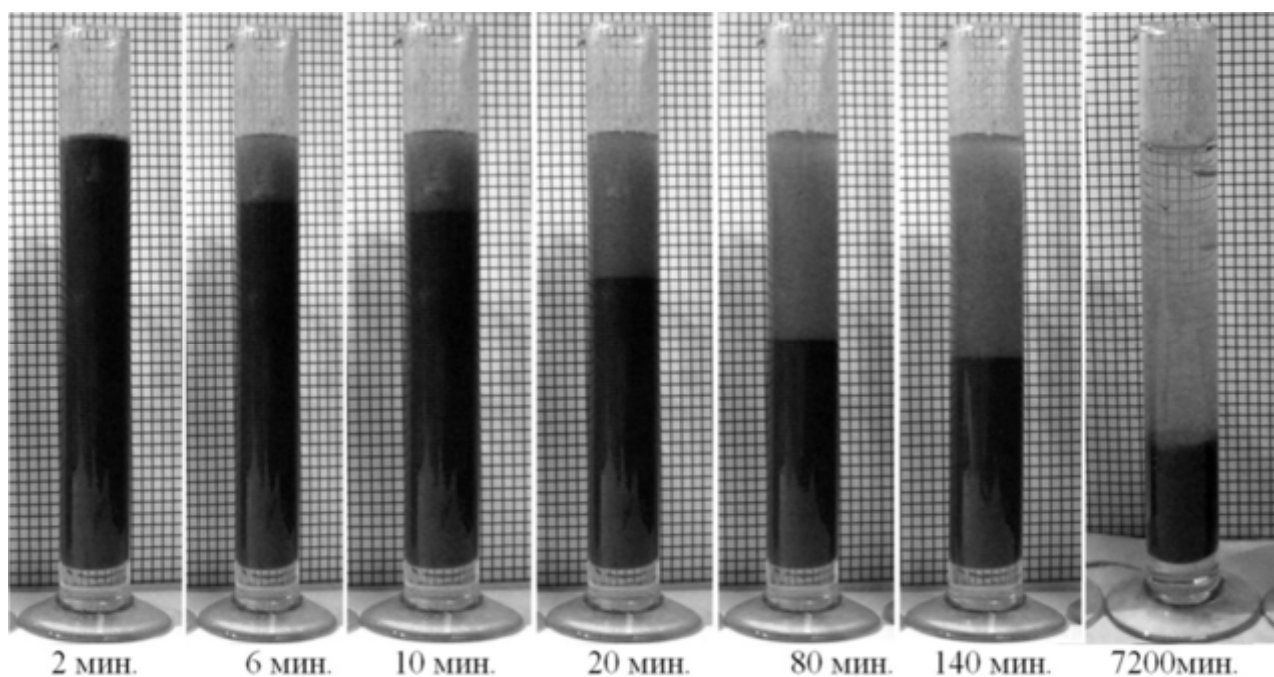


Рис. 4.3.6. Фотографии образцов водной суспензии биогумуса, без добавления щелочи, обработанной в РИА при $\omega R_p=39$ м/с.

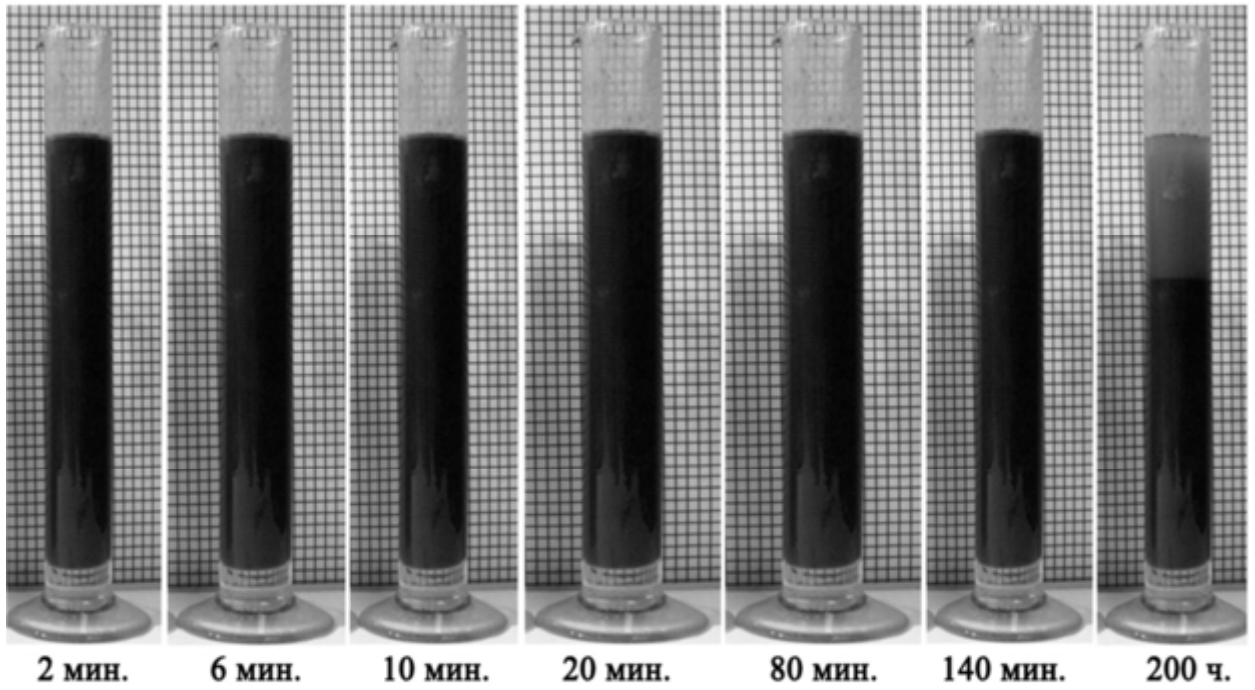


Рис. 4.3.7. Фотографии образцов водной суспензии биогумуса, обработанной в РИА при $\omega R_p = 39$ м/с с добавлением щёлочи.

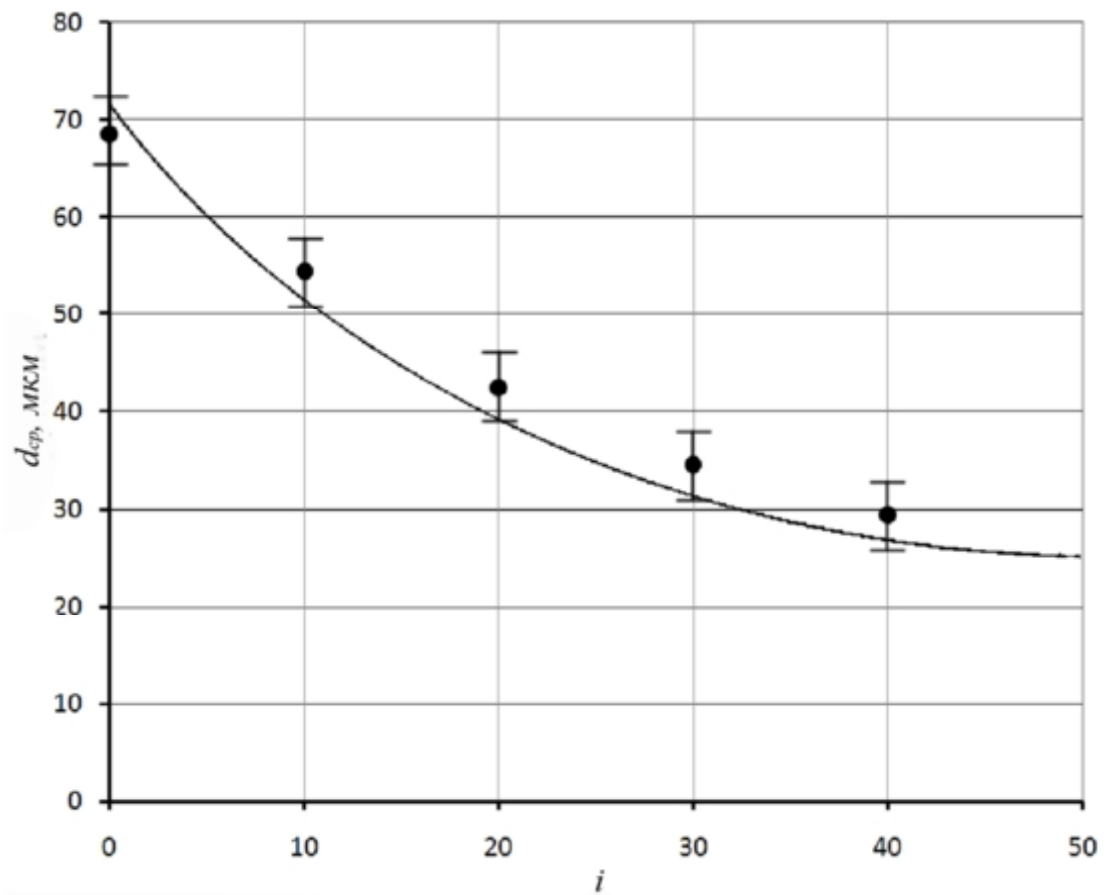


Рис. 4.3.8. График изменения средних размер частиц биогумуса в зависимости от количества циклов обработки суспензии в РИА.

Размер частиц суспензии биогумуса определялся измерением на оптическом микроскопе, марки МБИ – 3 с помощью объект-микрометра.

На рис. 4.3.9 представлена фотография исходной суспензии биогумуса, без предварительного измельчения. На фотографии хорошо различимы частицы размера 1-2 мм. На рис. 4.3.10 представлена фотография суспензии биогумуса, обработанной в РИА. Суспензия состоит из раздробленных практически однородных частиц.

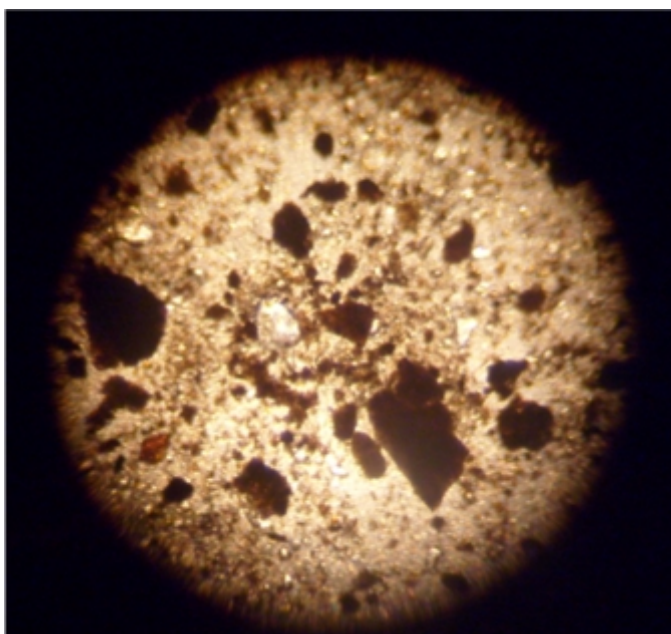


Рис. 4.3.9. Фотография частиц исходной суспензии биогумуса.

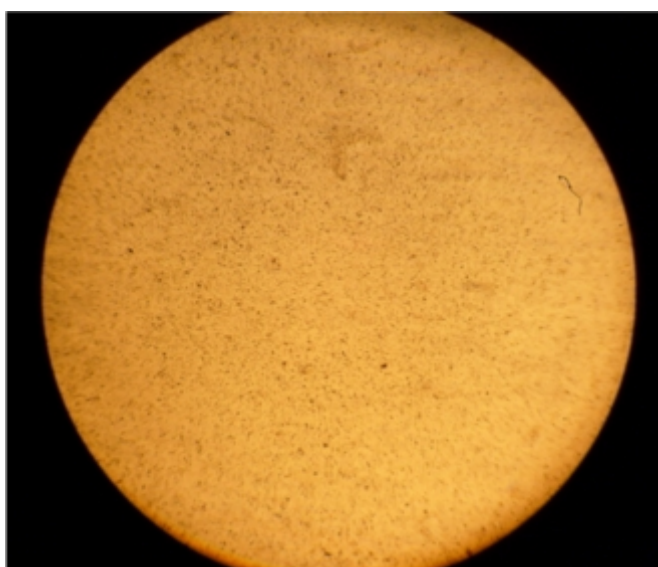


Рис. 4.3.10. Фотография частиц обработанной в РИА суспензии биогумуса.

Применение РИА для интенсификации процесса экстрагирования гуминовых кислот позволяет повысить концентрацию гуминовых кислот в водной суспензии биогумуса и получить качественные жидкие органические удобрения. На основе опыта приготовления суспензий жидких гуминовых удобрений можно рекомендовать соотношение жидкой и твердой фаз в суспензии $4 \leq L/G \leq 10$. Соотношение выбрано исходя из требований работы РИА без пробуксовки и заклинивания при обработке суспензии. При соотношении $4 \leq L/G$ содержание ГК достаточно велико и соотношение фаз позволяет транспортировать суспензию в РИА центробежным насосом и РИА надежно работает без заклинивания при зазоре между ротором и статором 0,1 мм - 0,2 мм. Верхнее ограничение $L/G \leq 10$ выбрано исходя из минимальной концентрации ГК по требованиям производителя ООО «Биогумус».

Разработанный РИА для производства жидких гуминовых удобрений из биогумуса и рекомендации по приготовлению водной дисперсии биогумуса приняты к внедрению в ООО «Биогумус» (г. Тамбов) (Приложение 11).

Одной из проблем при производстве жидких органических гуминовых удобрений (ГУ) из торфа и биогумуса является присутствие в растворе готовой продукции живых клеток бактерий и спор грибов, свободноплавающих и иммобилизованных на остатках частиц исходного материала. Интенсивная гидродинамическая обработка жидкости используется для уничтожения бактерий [142–145]. Некоторые виды грибов могут проявлять фитопатогенные свойства. При длительном хранении ГУ такие микроорганизмы способны активно расти и размножаться. Их развитие и накопление продуктов жизнедеятельности могут приводить к снижению качества готовой продукции. Удобрение на основе торфа выбрали для исследования по обеззараживанию жидких ГУ как содержащее большое количество спор грибов и бактерий по сравнению с удобрениями на основе биогумуса.

Задачей данного исследования было установление эффективности обеззараживания жидкого ГУ из торфа при обработке в РИА. Обработку жидкого ГУ из торфа проводили в установке на базе РИА при $\omega R_p = 30$ м/с и $\omega R_p = 39$ м/с.

Жидкие ГУ обрабатывали при пятикратном прохождении жидкости через РИА, т.е. при пяти циклах многофакторного воздействия.

Пробы для микробиологических анализов отбирали из исходных, необработанных ГУ. Влияние многофакторной обработки в РИА оценивали по изменению содержания клеток бактерий и спор грибов, и также по изменению численности и состава жизнеспособных микроскопических грибов в образцах ГУ до и после обработки. Микробиологические исследования проводили в лаборатории факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова.

Подсчет содержания бактериальных клеток, грибного мицелия и спор осуществляли прямым люминесцентным методом на микроскопе *Axioskop 2+* (*Karl Zeiss*) с использованием красителя Акридин Оранжевого из разведения 1:10. Образцы просматривали в 3-кратной повторности препаратов по 30 полей зрения в каждом при 320-кратном увеличении для подсчета содержания грибных спор и мицелия, и при 800-кратном увеличении для подсчета содержания бактериальных клеток и актиномицетного мицелия.

Присутствие жизнеспособных культивируемых микроскопических грибов в образцах ГУ до и после обработки проводили методом посева на две питательные среды: стандартно используемую для выделения микромицетов минеральную среду Чапека (Ч) с добавлением стрептомицина [146] и селективную для выделения фитопатогенных грибов среду крахмало-глюкозный агар (КГА) с добавлением бенгальского розового [147]. Использовали разведение 1:10. Посевы проводили в 2-х кратной повторности проб из каждой пробы и 3-х кратной повторности чашек Петри на каждую среду для каждой пробы. Посевы инкубировали при температуре 25 °С в течение 12–14 дней для остальных. Далее проводили учет посевов – оценивали общую численность грибных колониеобразующих единиц (КОЕ) на чашках Петри, видовой состав, частоту встречаемости (как отношение числа повторностей, где вид выделялся, к общему числу повторностей для образца) и относительное обилие (долю в общей численности) выделенных видов грибов [146].

Отдельно был проведен эксперимент по оценке возможности обеззараживания ГУ с помощью гидродинамической обработки от фитопатогенных грибов. Для этого образцы ГУ заражали споровой суспензией гриба *Fusarium solani* в конечной концентрации 10^2 КОЕ/мл: в 20 литров ГУ вносили 3 мл суспензии в концентрации 10^6 КОЕ/мл. Жизнеспособность спор гриба в зараженных образцах ГУ до и после обработки на РИА при $\omega R_p = 39$ м/с оценивали по способности к росту на питательных средах Чапека и КГА, учитывали численность выросших колоний гриба через 7–10 суток инкубации при температуре 25°.

При анализе пробы суспензии гуминового удобрения после 5 циклов обработки, методом люминесцентной микроскопии, установлено, что содержание клеток бактерий – кокки и бактерий – палочки в пробах ГУ, после их импульсного гидромеханического обеззараживания многократно уменьшилась (4.3.11).

Обработка в РИА гуминовых удобрений на основе торфа способствует снижению численности грибных спор (4.3.12). После проведения обработки ГУ в РИА при $\omega R_p = 39$ м/с выявлено снижение численности спор грибов диаметром менее 3 мкм с 13.800.000 спор/мл, до 2.000.000 спор/мл. Соответственно количество спор грибов уменьшилось в 7 раз.

В таблице 4.3.1 представлен видовой состав и показатели структуры сообществ культивируемых микроскопических грибов в исследованных образцах ГУ (в числителе - частота встречаемости вида, в %, в знаменателе – относительное обилие вида, в %).

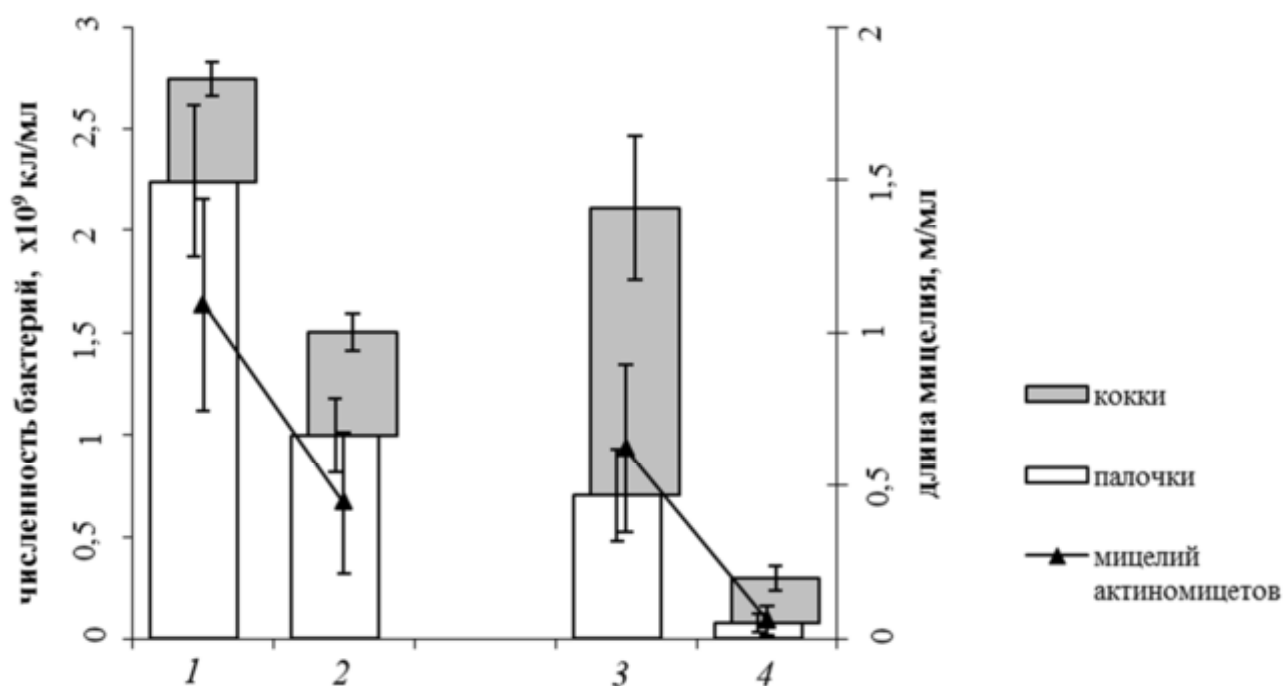


Рис. 4.3.11. Содержание клеток бактерий и актиномицетного мицелия в пробах суспензии гуминового удобрения при обработке в РИА.

Содержание бактерий кокки, палочки:

1 – до обработки; 2 – после обработки при $\omega R_p=39$ м/с,
3 – до обработки; 4 – после обработки при $\omega R_p=30$ м/с.

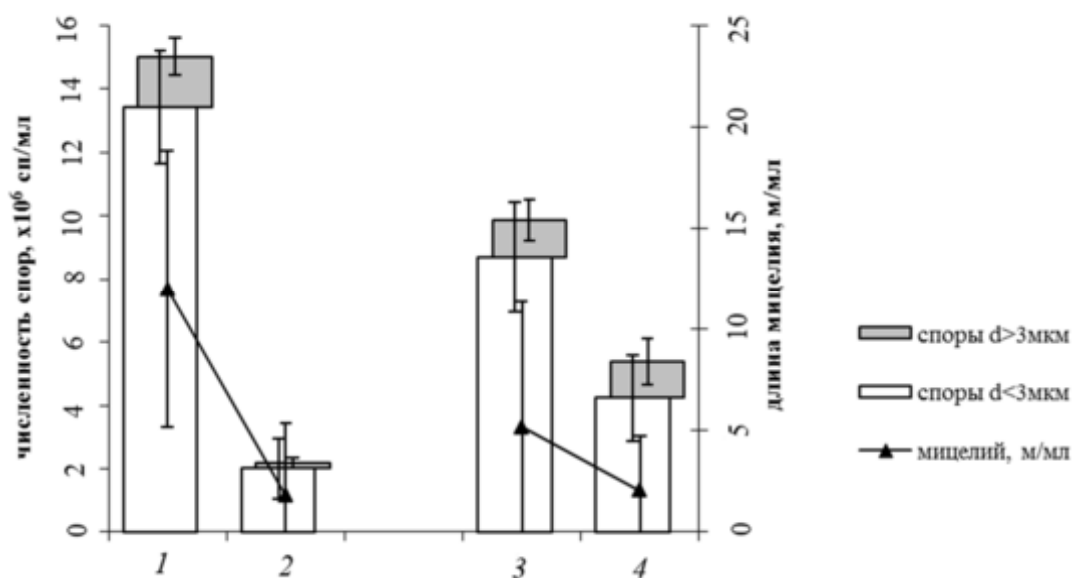


Рис. 4.3.12. Содержание спор грибов и мицелия грибов в пробах гуминовых удобрений по данным люминесцентной микроскопии:

1 – до обработки; 2 – после обработки при $\omega R_p=39$ м/с,
3 – до обработки; 4 – после обработки при $\omega R_p=30$ м/с.

Таблица 4.3.1.

Видовой состав и структура исследованных образцов после обработки в РИА при $\omega R_p=39$ м/с (в числителе - частота встречаемости вида, в %, в знаменателе – относительное обилие вида, в %)

Образец \ Вид	ОУ до обработки	ОУ после обработки
<i>Acremonium</i> sp	13/1,4	
<i>Aspergillus flavus</i>	50/18,3	13/1,6
<i>Aspergillus versicolor</i>		13/12,5
<i>Clonostachys rosea</i>	13/2,8	13/1
<i>Eupenicillium</i> sp.		25/7
<i>Penicillium aurantiogriseum</i>	50/22,5	38/25,3
<i>Penicillium griseofulvum</i>	38/6	-
<i>Penicillium janthinellum</i>	13/2,5	13/6,3
<i>Penicillium simplicissimum</i>		13/6,3
<i>Penicillium spinulosum</i>	25/15	25/2,6
<i>Trichoderma atroviride</i>	63/29,8	13/6,3
Стерильный темноокрашенный мицелий	13/1,8	13/6,3
Выделено видов:	9	10

Результатом импульсной многофакторной обработки ГУ в РИА явилось снижение в 2 раза численности способных к росту колониеобразующих единиц (КОЕ) – спор и фрагментов мицелия – культивируемых микроскопических грибов (рис. 4.3.13).

Видовое разнообразие грибов после обработки сохранялось, существенного изменения таксономического состава содержащихся в образцах микромицетов не отмечено. В структуре выделенных из ГУ грибных комплексов – как до, так и после обработки – преобладали по частоте встречаемости и/или относительному обилию виды *Penicillium aurantiogriseum* и *Aspergillus flavus*, как типичные выделялись *Penicillium spinulosum*, *Penicillium janthinellum*, *Trichoderma atroviride*. В тоже время после импульсной многофакторной обработки установлено снижение уровня присутствия ряда видов, в том числе доминирующих. Например, показано существенное сокращение частоты встречаемости и численности

жизнеспособных (т.е. способных к росту) КОЕ вида *Trichoderma atroviride* (рис. 4.3.13).

После кавитационной обработки образцов ГУ, содержащих споры фитопатогенного гриба *Fusarium solani*, было выявлено уменьшение уровня присутствия жизнеспособных спор этого гриба. Согласно результатам посева на питательные среды, численность жизнеспособных КОЕ *F.solani* до обработки соответствовала внесенному уровню и снижалась после обработки зараженного образца в РИА при $\omega R_p=30$ м/с (4.3.14).

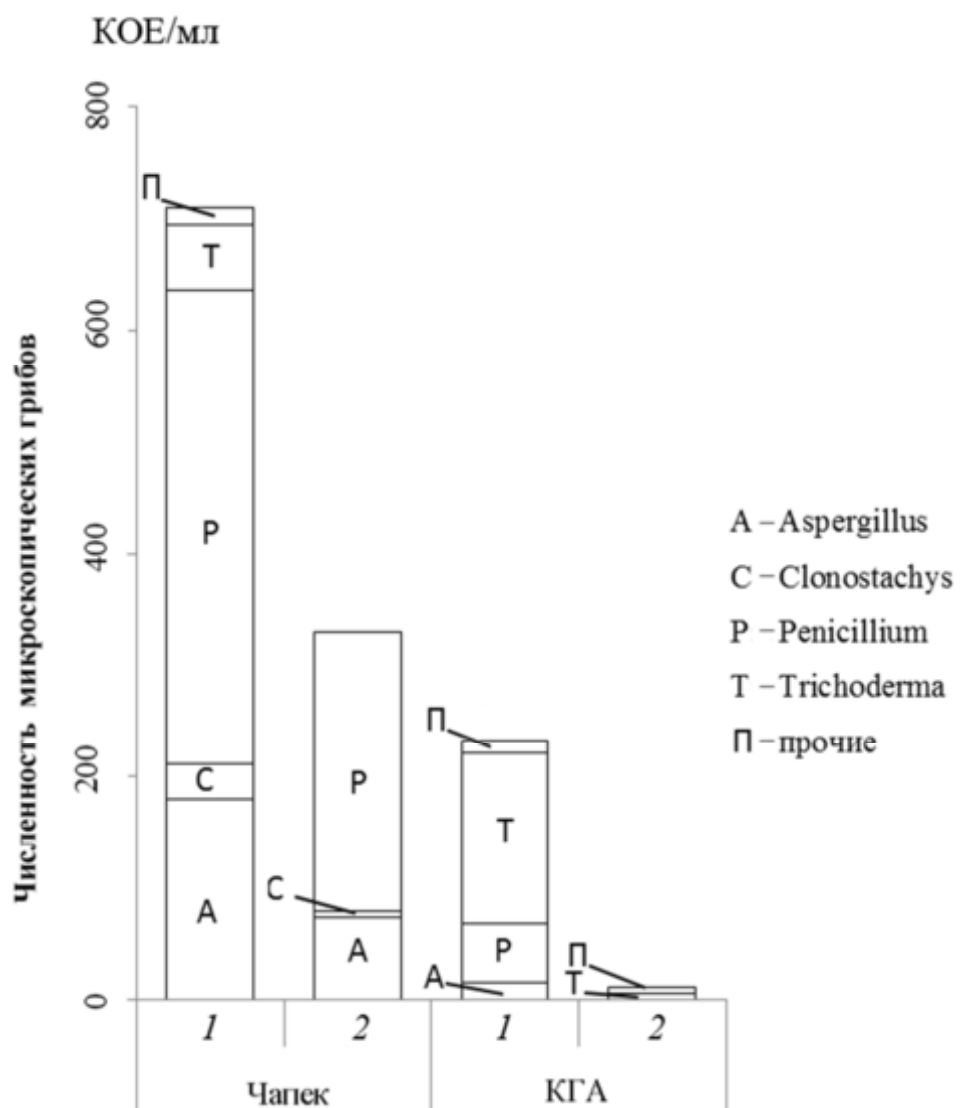


Рис. 4.3.13. Численность жизнеспособных колониеобразующих единиц (КОЕ) микроскопических грибов в пробах гуминовых удобрений, выявленные методом посева на питательные среды Чапека и картофельно-глюкозный агар:

1 – до обработки в РИА; 2 – после обработки в РИА при $\omega R_p=39$ м/с.

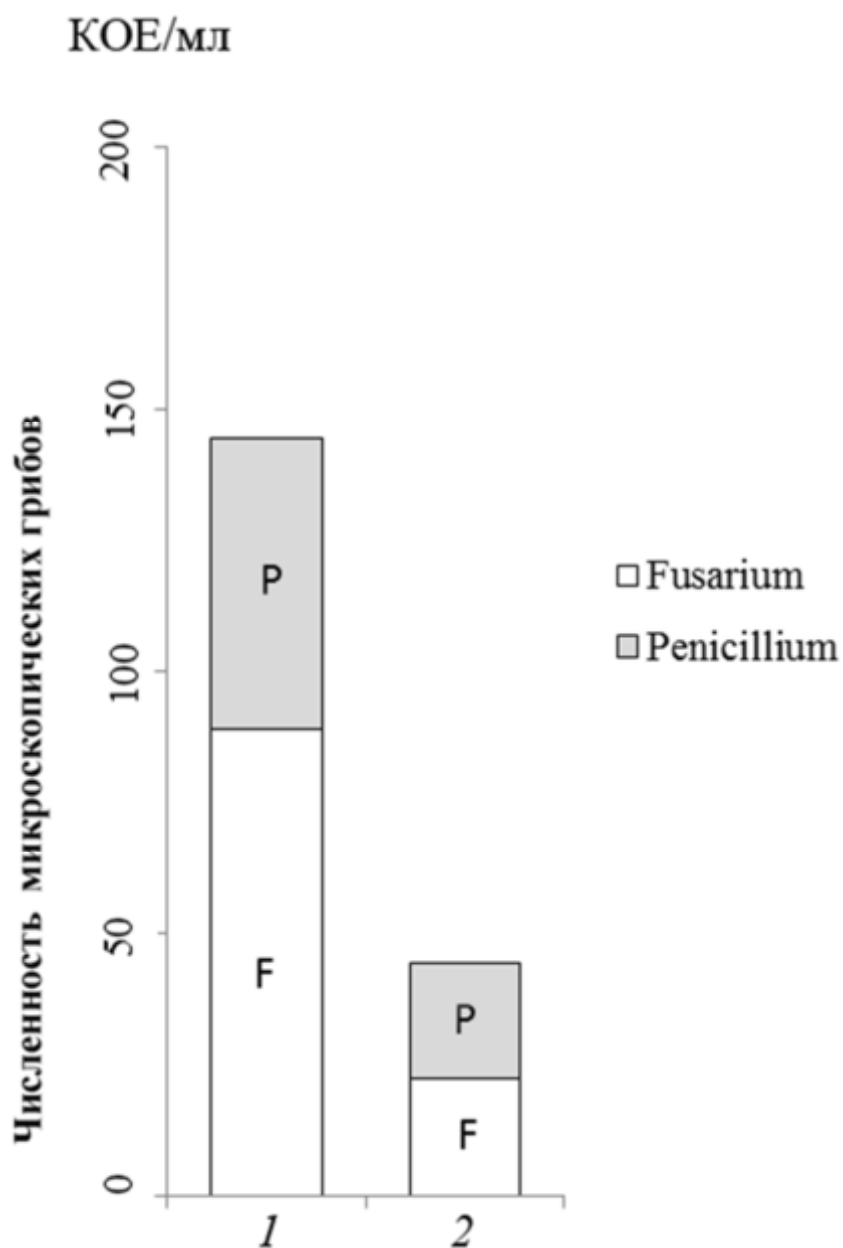


Рис. 4.3.14. Численность жизнеспособных колониобразующих единиц (КOE) микроскопических грибов в образце ГУ, зараженном спорами фитопатогенного гриба *Fusarium solani* (усредненные данные посевов на питательные среды Чапека и картофельно-глюкозный агар):

1 – до обработки; 2 – после обработки в РИА при $\omega R_p = 30$ м/с.

В процессе обеззараживания в РИА жидких гуминовых удобрений на основе торфа получены результаты, которые представлены в таблице 4.3.2.

Результаты обработки жидких гуминовых удобрений
на основе торфа в РИА.

№	Измеряемый параметр	Значение до обработки	Значение после обработки	Кратность уменьшения
1	Количество бактерий кокки, кл/мл	$2 \cdot 10^9$	$0,25 \cdot 10^9$	8
2	Количество бактерий палочки, кл/мл	$0,75 \cdot 10^9$	$0,1 \cdot 10^9$	7,5
3	Длина актиномицетного мицелия, м/мл	1	0,15	6,6
4	Количество спор грибов диаметра менее 3 мкм, сп/мл	$13,7 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	6,8
5	Количество спор грибов диаметра более 3 мкм, сп/мл	$15 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^6$	7,1
6	Длина мицелия грибов, м/мл	8	1	8
7	Количество грибов Trichoderma, КОЕ/мл	210	10	12
8	Количество плесени Penicillium, КОЕ/мл	600	300	2
9	Количество колониеобразующих единиц бактерий Fusarium, КОЕ/мл	90	20	4,5
10	Количество колониеобразующих иц бактерий Penicillium, КОЕ/мл	145	46	3,2

Таким образом, эффективность дезинфицирующего действия обработки в РИА жидких ГУ была подтверждена сокращением общего содержания клеток бактерий, спор и мицелия грибов, а также уменьшением численности жизнеспособных, то есть способных к росту микроскопических грибов.

4.4. Выводы по четвертой главе

На основе анализа рабочих зон разработана новая конструкция роторного импульсного аппарата для процесса экстрагирования, обеспечивающая интенсивную обработку жидкости в полости ротора и предварительную подготовку обрабатываемой жидкости перед воздействием на нее в каналах ротора и статора, зазоре между ротором и статором. Вариант исполнения профиля радиального сечения внутренней полости ротора, выполненный в форме одного или нескольких последовательных сужений и расширений или профилей сечения трубки Вентури, генерирует срыв вихрей и пульсации давления. На разработанную конструкцию получен патент на полезную модель РФ № 147138.

Разработана и запатентована новая конструкция аппарата с регулируемым зазором с исполнением конструкции ротора и статора в форме дисков (патент на полезную модель РФ № 130877). Конструкция аппарата позволяет эффективно обрабатывать суспензии, например жидких ГУ из биогумуса или торфа, за счет рационального расположения каналов в роторе и статоре, без разборки аппарата устанавливать необходимый зазор для конкретного типа сырья.

Разработана принципиальная технологическая схема установки для получения и обеззараживания жидких ГУ. Проведены экспериментальные исследования по приготовлению жидких гуминовых удобрений в РИА. По результатам исследования процесса экстрагирования ГК из биогумуса выявлено, что концентрация ГК в воде при обработке в РИА выше в несколько раз выше по сравнению с концентрацией, полученной при обработке ленточной мешалкой по традиционной технологии.

Экспериментально изучено влияние обработки суспензии ГУ в РИА на клетки бактерий, спор и мицелия грибов, а также макроскопических грибов. Дезинфицирующее действие обработки жидких ГУ в РИА было подтверждено значительным сокращением общего содержания клеток бактерий, спор и мицелия

грибов, а также уменьшением численности жизнеспособных микроскопических грибов.

Расслоение суспензии биогумуса, обработанной в РИА, без добавления и с добавлением щелочи, происходит с меньшей долей выделившейся воды по сравнению с традиционной технологией получения жидких ГУ в аппарате с лопастной ленточной мешалкой. Расслоение готового гуминового удобрения происходит достаточно медленно, что повышает срок его использования.

Разработана технологическая схема и даны рекомендации по соотношению твердой и жидкой фазы суспензии ($4 \leq L/G \leq 10$) для процесса экстрагирования ГК из биогумуса, принятые к внедрению в ООО «Биогумус» (г. Тамбов).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнен анализ процесса экстрагирования в РИА и показана эффективность его применения для интенсификации процесса экстрагирования ГК из гуматосодержащего сырья.

2. Установлено, что для увеличения коэффициента массоотдачи и интенсификации процесса экстрагирования гуминовых кислот в РИА необходимо увеличивать удельную энергию в канале статора и зазоре между ротором и статором РИА. Удельная энергия в РИА возрастает при увеличении скорости и ускорении потока жидкости в РИА.

3. Выполнен анализ методов расчета скорости, ускорения и импульсного давления потока жидкости в канале статора РИА с применением программных продуктов FlexPDE и ANSYS CFX. Установлено, что данные значений скорости и ускорения, адекватные экспериментальным данным, позволяют получить численный метод решения нестационарного уравнения Бернулли и программный продукт ANSYS CFX.

4. Разработан программный комплекс на базе программы расчета на ЭВМ полей скорости и давления в РИА (Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010612236), позволяющий определять в численном и графическом виде скорость, ускорение, давление потоков жидкости, а также расход и мощность.

5. Для расчета производительности и мощности РИА определен вид поправочной функции и эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние центробежных сил и вязкости на течение жидкости в полости ротора.

6. Уточнены критериальные зависимости расчета коэффициента массопередачи по жидкой фазе при экстрагировании ГК в РИА. Экспериментально получены коэффициенты критериального уравнения процесса экстрагирования ГК из биогумуса в РИА.

7. Разработаны новые конструкции РИА для процесса экстрагирования, защищенные патентами РФ на полезную модель № 130877 и № 147138.

8. Рекомендации по соотношению основных параметров РИА ($5 \leq l_{p,c}/a_{p,c} \leq 10$; $250 \leq R_p/\delta \leq 1250$; $5 \leq h_{p,c}/a_{p,c} \leq 15$; $144 \leq z/R_p \leq 480$) используются для изготовления и эксплуатации РИА в ООО «Амальтеа-Сервис» (г. Москва).

9. Изучено влияние обработки в РИА суспензии ГУ на клетки бактерий, спор и мицелия грибов, а также макроскопических грибов. Дезинфицирующее действие обработки жидких ГУ в РИА было подтверждено многократным сокращением общего содержания клеток бактерий, спор и мицелия грибов, а также уменьшением численности жизнеспособных микроскопических грибов.

10. Разработана технологическая схема и даны рекомендации по соотношению твердой и жидкой фазы суспензии ($4 \leq L/G \leq 10$) для процесса экстрагирования ГК из биогумуса, принятые к внедрению в ООО «Биогумус» (г. Тамбов).

Условные обозначения

- $\lambda(t)$ – коэффициент гидравлического сопротивления трения;
 Δ_y – смещение каналов.
 β – коэффициент массоотдачи, м/с; коэффициент количества движения;
 δ – величина зазора между ротором и статором, м;
 ε – удельная энергия, Вт/кг;
 μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;
 ξ – коэффициент местного гидравлического сопротивления;
 ρ – плотность обрабатываемой среды, кг/м³;
 σ – удельная поверхность контакта фаз, м²/м³;
 ω – угловая скорость ротора, с⁻¹;
 ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м/с²;
 τ – касательное напряжение, н/м²;
 v – объем, м³;
 γ – коэффициент;
 χ – число импульсной кавитации;
 Ω – телесный угол, рад.;
 a_c, a_p – ширина прямоугольных каналов статора и ротора, м;
 b_c – расстояние между стенками соседних каналов статора, м;
 b_p – расстояние между стенками соседних каналов ротора, м;
 b_n – высота (длина) перемешивающего органа, м;
 $A, B, C, c, e, d, g, f, n, m, k_1, k_2$ – коэффициенты;
 $B(t)$ – коэффициент гидравлических потерь;
 c – концентрация целевого компонента в жидкой фазе, кг/(кг раствора);
 c_p, c_n, c_k – равновесная, начальная и конечная концентрации вещества в растворе, кг/(кг раствора);
 c_i, c_{i-1} – концентрации вещества в жидкости после i и $i-1$ циклов экстрагирования, кг/м³;

Δc – движущая сила процесса, кг/м³;

d – характерный размер частиц, м;

$d_э$ – эквивалентный диаметр канала статора, м;

D – коэффициент диффузии, м²/с;

D – диаметр перемешивающего органа, м;

G – масса твёрдой фазы, кг;

G – масса твердого вещества, кг;

h_i – величина зазора между дисками i ступени, м;

h_k – высота рабочей камеры, м;

h_p – высота прямоугольного канала ротора, м;

h_c – высота прямоугольного канала статора, м;

k – коэффициент;

K_c – коэффициент массопередачи по жидкой фазе, кг. раствора/(с·м³);

K_{cv} – объемный коэффициент массопередачи по жидкой фазе, кг
раствора/(с·м³);

l_p – длина канала ротора, м;

l_c – длина канала статора, м;

L – масса жидкости, кг;

M_i – количество извлеченного вещества, кг;

n_0 – частота вращения, об/с;

N – мощность, Вт;

N_0 – мощность привода при вращении ротора сухого аппарата (мощность холостого хода) , Вт;

N_I – энергозатраты в паре ротор-статор, Вт;

N_2 – затраты энергии на перемещение жидкости в прорезях ротора, Вт;

N_a – акустическая мощность, которая в расчетах может не учитываться, Вт;

$N_{дис\max}$ – мощность диссипации сил трения, Вт;

N_{Γ} – гидравлическая мощность, Вт;

N_D – затраты мощности на трение жидкости в межцилиндровых зазорах, Вт;

N_{II} – мощность измельчения, Вт;

N_K – мощность кинетической энергии жидкости в роторе, Вт;

N_M – мощность на трение в подшипниках, в уплотнениях вала, Вт;

N_O – мощность, расходуемая на объемные потери жидкости, Вт;

N_T – мощность транспортировки жидкости через одну ступень, Вт;

N_T – мощность сил трения в зазоре между ротором и статором, Вт;

N_y – потери мощности связанные с утечками жидкости через уплотнение, Вт;

$N_{\text{елу}}$ – мощность, потребляемая уплотнениями, Вт;

$N_{\text{хх}}$ – мощность холостого хода, Вт;

P – давление, Па;

P_u – амплитуда импульса давления, Па;

$P_{\text{нп}}$ – давление насыщенных паров обрабатываемой жидкости, Па;

$P_{\text{нас.пара}}$ – давление насыщенных водяных паров, Па;

P_c – давление на выходе из канала статора, Па;

P_p – статическое давление в полости ротора, Па;

$P_{\text{ц}}$ – центробежное давление, Па;

ΔP – перепад давления между полостью ротора и рабочей камерой, Па;

R_a – радиус цилиндрической полости, образованной вращающейся жидкостью в роторе, м;

R_p – радиус внешней поверхности ротора, м;

R_B – радиус вала, м;

R_D – радиус диска, м;

S – площадь, м²;

S_0 – площадь сечения канала статора, м²;

S_1 и S_2 – значение площади поверхностей цилиндров в кольцевом зазоре;

$S_{\text{отв}}$ – площадь каждого отверстия диска, м²;

$S_{\text{отв}i}$ – площадь отверстия i диска, м²;

t – время, с;
 t_1 – время совмещения каналов ротора с каналами статора, с;
 t_2 – время нахождения объема жидкости в канале статора, с;
 t_i – время i -го цикла, с;
 T – период, с;
 V – скорость, м/с;
 Q – расход жидкости, м³/с.;
 Q_{Γ} – переменный расход через одно отверстие, м³/с;
 Q_m – амплитуда изменений расхода, м³/с;
 Q_T – транзитный расход, м³/с;
 Q_{max} – расход при совпадающих каналах, м³/с.
 Q_{min} – расход при перекрытых каналах, м³/с.
 $\bar{V}_r$ – среднемассовая радиальная скорость, м/с;
 $V_{ж}$ – объем жидкости, м³;
 V_c – средняя по сечению радиальная скорость, м/с;
 w – скорость звука в жидкости, м/с;
 z – количество каналов;
 z_p – число каналов ротора;
 z_c – число каналов статора;
 $\Gamma_1, \Gamma_2 \dots$ – симплексы геометрического подобия.

Критерии

$K_N = f(Re_p, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots)$ – критерий мощности, определяемый из эксперимента;
 $Re = (v \cdot d \cdot \rho) / \mu$ – критерий Рейнольдса;
 $Re_{\varphi} = (\omega \cdot R_p^2 \cdot \rho) / \mu$ – центробежный критерий Рейнольдса;
 $Re_z = (v \rho h) / \mu$ – осевой критерий Рейнольдса;
 $Sc = \mu / (\rho \cdot D)$ – критерий Шмидта;
 $Sh = (K \cdot d) / D$ – число Шервуда.

Список использованной литературы

1. Аксельруд, Г.А. Растворение твердых веществ /. Г.А. Аксельруд, А.Д. Молчанов – М.: Химия, 1977. – 272 с.
2. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: Теория и практика. – М.: Машиностроение, 2001. – 260с.
3. Рудобашта, С.П. Диффузия в химико-технологических процессах. Учебное пособие. 2- е изд., перер. и доп. / С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов // – М.: 2010. – 476 с.
4. Новикова, И.В. Исследование скорости экстрагирования компонентов из древесного сырья / И.В. Новикова, Г.В. Агафонов, Т.С. Корниенко, О.Ю. Мальцева // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, 2012. - Т.3 – С. 99 – 103.
5. Иванов, С.С. Кинетика извлечения экстрактивных веществ из люпина с различной геометрической формой / С.С. Иванов, профессор Ю.И. Шишацкий, С.Ю. Плюха // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, 2014. - Т.1 – С. 36 – 39.
6. Кульнева, Н.Г. Разработка эффективного способа экстрагирования сахарозы из свеклы / Н.Г. Кульнева, М.В. Журавлев, К.А. Парамонова// Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, 2014. – Т.1 – С. 181 – 184.
7. Романков, П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов – Л.: Химия, 1990. – 384 с.
8. Романков, С.П., Курочкина М.И. Экстрагирование из твердых материалов. – Л.: Химия, 1983. – 256 с.
9. Шервуд Т., Пигфорд Р.Л., Уилки Ч. Массопередача / Пер. с англ. под ред. В.А. Малюсова. – М.: Химия, 1982. – 696 с.
10. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980. – 248 с.

11. Аксельруд, Г.А. Экстрагирование (система твердое тело – жидкость) / Г.А. Аксельруд, В.М. Лысянский – Л.: Химия, 1974. – 256 с.
12. Белоглазов И.Н. Твердофазные экстракторы. – Л.: Химия, 1985. – 240 с.
13. Промтов, М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества. Учебное пособие. – М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2004. – 136 с.
14. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. 2-е изд. В 2-х кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. 368 с.
15. Борисов, А.Г. Кинетика процессов экстрагирования полисахаридов из корнеплодов скорцонера испанского под воздействием электрического разряда / А.Г. Борисов, В.Н. Оробинская, В.Т. Казуб // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2011. – Т. 17, №2. – С. 410 – 416.
16. Оробинская, В.Н. Кинетика и технология электроразрядного экстрагирования биологически активных соединений из органического сырья. :дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08/ Оробинская Валерия Николаевна. – Тамбов, 2012. – 141 с.
17. Балабудкин, М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. – М.: Медицина, 1983. – 160 с.
18. Соснина, Н.А. Экстрагирование пектиновых веществ амаранта в суперкавитирующем аппарате роторно-пульсационного типа. / Н.А. Соснина [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 1999, вып. 6. – С. 32 – 35.
19. Гимаев, И.Н. Обоснование использования ультразвукового оборудования в технологии ликероводочного производства./ И.Н. Гимаев, Н.К. Романова, О.А. Решетник.// Энерго и ресурсосберегающие технологии. – 2004. – вып. 2. – С. 99.
20. Басок, Б.И. Дисперсный анализ соевой пасты, полученной при роторно-пульсационной гомогенизации./ Б.И. Басок, И.А. Пироженко, А.В. Булавка.// Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, вып. 4. – С. 80–85.

21. Скиба, В.В. Гидроизлучатели роторно-пульсационного типа в процессах биотехнологии // В.В. Скиба, М.А. Балабудкин, В.Г. Щербатин Динамические эффекты мощного ультразвука: Сб. науч. тр. – Ижевск. – 1988. вып. 3. – С. 68 – 71.

22. Анашенков, С.Ю. Водно-щелочная экстракция древесной зелени. Влияние конструктивных особенностей экстрактора роторно-пульсационного типа и гидромодуля на выход экстрактивных веществ/ С.Ю. Анашенков, В.И. Рошин, О.А. Чернышова// Химия растительного сырья. – 2008, вып. 3. – С. 65 – 70.

23. Грабова, Т.Л. Применение метода дискретно-импульсного ввода энергии для получения структурированных спиртосодержащих систем./ Т.Л. Грабова // Промышленная теплотехника. – 2010. Т. 32, вып. 3. – С. 80 – 86.

24. Корнилова, Н.А. Влияние механоактивации на скорость реакции хитозана с бензальдегидом./ Н.А. Корнилова, И.М. Липатова// Химия и химическая технология. – 2010. Т. 53, вып. 8. – С. 84 – 88.

25. Мезина, Е.А. Влияние механической активации суспензий микрокристаллической целлюлозы в растворах хитозана на их реологические и пленкообразующие свойства./ Е.А. Мезина, И.М. Липатова// Химия и химическая технология. – 2011. Т. 54, вып. 3. – С. 91 – 94.

26. Мезина, Е.А. Влияние гидроакустического воздействия на совместимость хитозана с триацетатом целлюлозы./ Е.А. Мезина, И.М. Липатова, Н.В. Лосев// Химия и химическая технология. – 2011. Т. 54, вып. 2. – С. 79 – 83.

27. Макарова, Л.И. Гидроакустическое диспергирование жирных кислот в растворах хитозана./ Л.И. Макарова, Е.А. Мезина, И.М. Липатова// Химия и химическая технология. – 2010. Т. 53, вып. 11. – С. 59 – 62.

28. Липатова, И.М. Влияние гидроакустического воздействия на процесс растворения хитозана в водных растворах уксусной кислоты./ И.М. Липатова, Л.И. Макарова//Журнал прикладной химии. – 2008. Т. 81, вып. 12. – С. 2001 – 2006.

29. Федоров, А.В. К оценке длительности процесса периодического растворения дисперсного материала в роторно-пульсационном аппарате./А.В. Федоров [и др.]// Инженерно-физический журнал. – 2011. Т. 84, вып. 4. – С. 664-669
30. Бершитский, А.А. Исследование процесса автоклавно-содового выщелачивания щеелита в поле упругих колебаний/ А.А. Бершитский, Н.Н. Хавский, Шмалей Б.Н., И.А. Якубович, А.А. Кальков, В.К. Румянцев // Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов: Сб. науч. тр. – М.: Металлургия, 1970. – С. 193 – 197.
31. Зимин, А.И. Приготовление раствора эвкалимина в этиловом спирте в роторном аппарате при импульсном возбуждении кавитации// Хим.–фарм. журн. – 1996, №10. – С. 46 – 47.
32. Юдина, Н.В. Структурные особенности гуминовых кислот торфов, выделенных разными способами / Н.В. Юдина, В.И. Тихова // Химия растительного сырья. 2003. №1. - С. 93–96.
33. Валеев, В.Х. Исследование процесса механической промывки замасленных шламов донных отложений в условиях гидродинамической кавитации./ В.Х. Валеев, Ю.В. Сомова// Вестник Магнитогорского государственного технического университета. – 2012. Т. 3, – С. 55 –58.
34. Попов, А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование/ Под ред. Е.И. Ермакова. – СПб.: Изд-во С. – Петерб. ун-та, 2004. – 248 с.
35. ГОСТ 27593-88(2005). Почвы. Термины и определения.
36. Орлов, Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 325 с.
37. Kim H. Tan. Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies. CRC Press: 2 edition. 2014. – 495 p.
38. Перминова, И.В. Гуминовые вещества — вызов химикам XXI века // Химия и жизнь. 2008, №1. – С. 50-55.
39. Гостищева, М.В. Сравнительная характеристика методов выделения гуминовых кислот из торфов с целью получения гуминовых препаратов / М.В.

Гостищева, И.В. Федько, Е.О. Писниченко // Доклады ТУСУРа. 2004, № 1, – С. 66 – 69.

40. Патент РФ 2463282. МПК C05F 11/02. Способ получения водорастворимых гуминовых кислот. Опубликовано:10.10.2012. Бюл. №28.

41. Ефанов, М.В. Окислительный аммонолиз торфа в условиях кавитационной обработки / М.В. Ефанов, В.А. Новоженев, В.Н. Франкивский // Химия растительного сырья. 2010. №1. С. 165–169.

42. Ефанов, М.В. Получение оксигуматов натрия из торфа / М.В. Ефанов, Галочкин А.И., П.П. Черненко // Химия твердого топлива. 2008. №2. С. 24–28.

43. Москаленко, Т.В. Воздействие ультразвуковым полем на торф при экстрагировании гуминовых кислот/ Т.В. Москаленко, В.А. Михеев, О.С. Данилов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. №3. С. 209 – 213.

44. Москаленко, Т.В. Структурные превращения гуминовых кислот торфов при экстрагировании под действием ультразвукового и магнитного полей / Т.В. Москаленко, В.А. Михеев, О.С. Данилов // Химия растительного сырья. 2011. №4. С. 283–286.

45. Карманова, Л.П. Химическая переработка древесной зелени пихты – основа технологий получения биологически активных веществ / Л.П. А.В.Карманова, Кучин, В.А. Кучин // Известия вузов: Химия и химическая технология. – 2005. – № 2. – С. 3-11.

46. Бамбалов, Н. Н. Причины слабой растворимости гуминовых кислот верхового торфа в воде / Н. Н. Бамбалов, В. В. Смирнова, А. С. Немкович // Природопользование. Институт природопользования НАН Беларуси, 2011. Вып. 20. С. 91 – 94.

47. Цвирко, Л. Ю. Влияние гидродинамической кавитации на выход водорастворимых веществ из торфа / Л. Ю. Цвирко, Н. Н. Бамбалов, Г. А. Соколов // Природопользование. Институт природопользования НАН Беларуси, 2012. Вып. 21. С. 284 – 287.

48. Galambos, I. Mass-transfer model for humic acid removal by ultrafiltration/ Galambos I., Csiszar E., Bekassy-Molnar E., Vatai G. // Environment Protection Engineering, 2005, Vol. 5, N 3 – 4. pp. 145 – 152.

49. Басок, Б.И. Гидродинамика, теплообмен и эффекты дробления во вращательно-пульсирующих потоках // Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, А.А. Абраменко, И.А. Пироженко – Киев: Экспресс, 2012. – 296 с.

50. Балабудкин, М. А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М.А. Балабудкин. – М.: Медицина, 1983. – 160 с.

51. Промтов, М.А., Степанов А.Ю. Компьютерная система расчета роторного импульсного аппарата/ М.А. Промтов, А.Ю. Степанов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011, Т.17, №1. – С. 83 – 89.

52. Кокушкин, О.А. О расчёте мощности ротационных аппаратов / О.А. Кокушкин, А.А. Барам, И.С. Павлушенко // Журнал прикладной химии. - 1969. – Т. 42, № 8. – С. 1793 – 1798.

53. Дерко, П.П. О гидромеханических закономерностях работы роторно-пульсационных аппаратов / П.П. Дерко [и др.] / Теоретические основы химической технологии. – 1973. – Т. 7, №1. – С. 123 – 125.

54. Иванец, Г.Е. Энергетическая характеристика роторно-пульсационного аппарата / Г.Е. Иванец, В.А. Плотников, Г.Т.В. Плотников // Журнал прикладной химии. – 2000 – Т. 73, №9. – С. 1511 – 1514.

55. Давыденко, Б. В. Теплообмен, гидродинамика и процессы диспергирования в роторно-пульсационных и в многогрануляционных аппаратах: дис...канд. техн. наук: 05.14.06 / Давыденко Борис Викторович. – Киев, 2009. – 366 с.

56. Промтов, М.А. Интенсификация процессов эмульгирования и растворения в аппаратах роторного типа: дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / Промтов Максим Александрович. – Тамбов, 1992. – 149 с.

57. Балабышко, А.М. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. А.М. Балабышко, В.Ф. Юдаев. – М.: Недра, 1992. – 176 с.
58. Богданов, В. В. Эффективные малообъемные смесители/В. В. Богданов, Е. И. Христофоров, Б. А. Клоцунг. – Л.: Химия, 1989. – 224 с.
59. Червяков В. М. Основы теории и расчета деталей роторного аппарата: Учебное пособие/ В. М Червяков, Ю. В.Воробьев. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2008. – 114 с.
60. Червяков, В.М. Определение энергозатрат в роторных аппаратах / В.М. Червяков, А.А. Коптев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 4. – С. 10 –12.
61. Червяков, В.М. Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах// В.М. Червяков, В.Г. Однолько / – М.: Машиностроение, 2008. – 116 с.
62. Будрик, В. Г. Создание и исследование роторно- пульсационной установки для производства жидких и пастообразных молочных продуктов : дис...канд. техн. наук: 05.18.12 / Будрик Владислав Глебович. – Москва, 2005. – 191 с.
63. Промтов, М.А. Интенсификация химико-технологических процессов в импульсных потоках гетерогенных жидкостей (на примере процесса эмульгирования, диспергирования, растворения и экстрагирования) дис...докт. техн. наук: 05.17.08 / Промтов Максим Александрович. – Тамбов, 2001. – 517 с.
64. Чичева-Филатова, Л. В. Интенсификация технологических процессов, совмещенных с диспергированием в роторных аппаратах: дис...док. техн. наук: 05.18.12 / Чичева-Филатова Людмила Валерьевна. – Москва, 2006. – 316 с.
65. Николаев, Е. А. Разработка методов расчёта и моделирование малообъёмных роторных дезинтеграторов-смесителей: дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / Николаев Евгений Анатольевич. – Уфа, 2008. – 117 с.

66. Биглер, В.И. Нестационарные истечения реальной жидкости через отверстия гидродинамической сирены/ В.И. Биглер, В.Ф. Юдаев // Акустический журнал – Москва, 1978, № 2. С. 289 – 291.
67. Звездин, А.К. Использование аппаратов типа РАМП для получения высокодисперсных эмульсий в режиме акустической кавитации: автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17 08 / Звездин Александр Константинович. – Москва, 1983. – 16 с.
68. Юдаев, В.Ф. Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды // Теоретические основы химической технологии. 1994. Т. 28, № 6. С. 581 – 590.
69. Балабудкин, М.А. О закономерностях гидромеханических явлений в роторно-пульсационных аппаратах // Теоретические основы химической технологии. – 1975, Т. 9, №5. – С. 783 – 788.
70. Балабудкин, М.А. Исследование частотно-амплитудного спектра динамического давления в роторно-пульсационных аппаратах/ М.А. Балабудкин, А.А. Барам // Теоретические основы химической технологии. – 1968, Т. 2, №4. – С. 609 – 614.
71. Константинов, Б.П. Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченной среде. – М. – Л.: Наука, 1977. – 144 с.
72. Промтов, М.А. Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа. //Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. №9. С. 13–15.
73. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. – М.: Связь, 1973. – 272 с.
74. Юдаев В.Ф. Истечение газожидкостной смеси через отверстия ротора и статора сирены // Изв. вузов. Машиностроение. –1985, №12. - с. 60-66.
75. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. - М.: Недра, 1982. – 224 с.
76. Биглер В.И. Исследование течений в аппарате типа динамической сирены и его применение для процесса растворения: Автореф. дисс....канд. техн. наук. – М.: МИХМ, 1979. – 16 с.

77. Попов, Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с
78. Promptov, M., Experimental Study of Pulsed Acoustic Cavitation in the Hydrodynamic-Siren Type Pulser, Acoustical Physics, Vol. 43, No. 4, 1997, pp. 488 – 491
79. Yoshikawa, S., Koyano, K., Hydrodynamic siren as a broadband underwater sound projector, J. Acoust. Soc. Am, Vol. 98, No., pp. 1047 – 1056, 1995.
80. Басок, Б. И. Оборудование для получения и обработки высоковязких дисперсных сред / Б. И. Басок, А. П. Гартвиг, А. Р. Коба, О. А. Горячева // Теплообмен в технологических процессах (теплотехнология). Промышленная теплотехника. – 1996. Т. 18. – № 1. – С. 50-56.
81. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 464 с.
82. Биглер, В.И. Возбуждение кавитаций в аппаратах типа гидродинамической сирены / В.И. Биглер, В.Н. Лавренчик, В.Ф. Юдаев // Акуст. журн. 1978. Т. 24. № 1. С. 34 – 39.
83. Чугаев, Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
84. Юдаев, В.Ф. Методы расчета гидравлических и динамических характеристик модулятора роторного аппарата / В.Ф. Юдаев, А.И. Зимин, Л.Г. Базадзе // Изв. вузов. Машиностроение. – 1985, №1. – с. 65-70.
85. Юдаев, В.Ф. К методам расчета гидравлических и динамических характеристик модулятора роторного аппарата / В.Ф. Юдаев, А.И. Зимин, Л.Г. Базадзе // Изв. вузов. Машиностроение. – 1987, №11. – с. 63-65.
86. Математические методы в механике прерывистых течений // Межвузовский сборник научных статей / Под ред. А.И.Зими́на. – СПб.: Технопанорама, 1999. – 56 с.
87. Юдаев, В.Ф., Исследование гидродинамической сирены / В.Ф. Юдаев, Д.Т. Кокорев // Теоретич. основы химической технологии. 1969. № 10. С. 72 – 77.

88. Зимин, А.И. Прикладная механика прерывистых течений / А.И. Зимин. – М.: Фолиант, 1997. – 308 с.
89. Басок, Б. И. Гидродинамика, теплообмен и эффекты дробления во вращательно-пульсирующих потоках / Б. И. Басок, Б. В. Давыденко, А. А. Авраменко, И. А. Пироженко // Киев.: «ЕКСПРЕС», 2012. – 296с.
90. Червяков, В. М. Нестационарное течение идеальной сжимаемой среды в каналах роторного аппарата / В. М. Червяков, Ю. В. Воробьёв // Теоретические основы химической технологии. – 2005. Т. 39. – № 1. – С. 65 – 71.
91. Корякин, В.Е. Численное моделирование нестационарных движений вязкой жидкости в поворотных каналах / В.Е. Корякин, Ю.Е. Капьякин, А.Я. Нестеров // Инж.-физ. журн. 1988. Т. 54, № 1. С. 25 – 32.
92. Cooke, M. Power Consumption Characteristics of an In-Line Silverson High Shear Mixer / M. Cooke, T. L. Rodgers A. J. Kowalski // AIChE Journal 2011, Vol. 66, pp. 2068–2079.
93. Балабышко, А.М. Гидромеханическое диспергирование / А.М. Балабышко, А.И. Зимин, В.П. Ружицкий// – М.: Наука, 1998. — 331с.
94. Hall, S. Droplet break-up by in-line Silverson rotor–stator mixer / S. Hall, M. Cooke, A. El-Hamouz, A.J. Kowalski// Chemical Engineering Science, 2011, Vol. 66, No. 66 pp. 2068–2079.
95. Юдаев В.Ф. Исследование гидродинамического аппарата сиренного типа и его использования для интенсификации технологических процессов в гетерогенных системах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1970.
96. Сопин, А.И. Исследование параметров гидродинамической сирены с целью получения высокодисперсных гетерогенных сред: Автореф. дис.... канд. техн. наук. –М., 1975. –16 с.
97. Сопин, А.И. Исследование спектрального состава акустического поля гидродинамической сирены/ А.И. Сопин, Ю.П. Романов, В.М. Варламов и др.// Совершенствование конструкций машин и методов обработки деталей. Челябинск, 1975. С. 67 – 73. (Научн. тр. ЧПИ; № 164).
98. Скучик, Е. Основы акустики. Т. 1. –М.: Мир, 1976. –520 с.

99. Справочник по технической акустике: Пер. с нем. / Под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. Л.: Судостроение, – 1980. –440 с.
100. Монастырский, М. В. Интенсификация процессов диспергирования и экстрагирования в роторном импульсно-кавитационном аппарате: дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Монастырский Максим Вячеславович. – Тамбов, 2003. – 178 с.
101. Кафаров, В.В. Основы массопередачи. – М.: Высш. шк., 1972. – 797 с.
102. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. – 368 с.
103. Долинский, А.А. Принципы оптимизации массообменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии/ А.А. Долинский, А.И. Накорчевский // Промышленная теплотехника. – 1997, Т. 19, №6. – с. 5 – 9.
104. Басок, Б.И. Особенности гидродинамики роторно-пульсационных аппаратов дискового типа / Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, Ю.С. Кравченко (и др.) // Промышленная теплотехника. – 2003, Т.23, №3. – С. 21 – 25.
105. Червяков, В.М. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах: монография / В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев. – М.: "Издательство Машиностроение-1"», 2007. – 128 с.
106. Промтов, М.А. Основы метода расчета роторного импульсно-кавитационного аппарата // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2004, Т.10, №1А. – С. 149 – 154.
107. Карепанов, С.К. Аппараты с переходными гидромеханическими процессами и их характеристики/ С.К. Карепанов, М.А. Карнаух, М.А. Серова, В.Ф. Юдаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2001, № 12. – С. 3 – 6.
108. Промтов, М.А., Степанов А.Ю. Компьютерная система расчета роторного импульсного аппарата/ М.А. Промтов, А.Ю. Степанов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011, Т.17, №1. – С. 83 – 89.

109. Каплун, А.В. ANSYS в руках инженера: практ. руководство / А.В. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева// – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
110. Айнштейн, В.Г., Захаров, М.К., Носов, Г.А. и [др.] Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2 кн. /Под ред. В.Г. Айнштейна. М.: Логос; Высшая школа, 2002. Кн. 1. 912 с.
111. Физико- химические методы анализа / Под ред. В.Б. Алесковского, К.Б. Яцимирского//– Л.: Химия, 1971. – 424с.
112. Лепетаев, А. Н. Расчет и моделирование физических полей с использованием программы FlexPDE / А. Н. Лепетаев, А. В. Косых ; ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. – 134 с. : рис., табл. – Библиогр.: с. 132. –
113. Пат. 2343966 Российская Федерация, МПК B01F 7/00 Пульсационный аппарат роторного типа для обработки образивосодержащих смесей [Текст] / Б. А. Кесель; заявитель и патентообладатель Б.А.Кесель – № 2007134779/15 ; заявл. 18.09.07 ; опубл. 20.01.09, Бюл. № 2 (II ч.). – 7 с. : ил.
114. Пат. 2365415 Российская Федерация, МПК B02C 18/00. Роторно-кавитационное устройство для получения взвесей и экстрактов непрерывного действия с встроенным насосом [Текст] / Д. П. Свиридов ; заявитель и патентообладатель Д.П. Свиридов – № 2006100204/03 ; заявл. 25.09.06 ; опубл. 27.08.09, Бюл. № 24 (II ч.). – 7 с. : ил.
115. Пат. 2397793 Российская Федерация, МПК B01D 11/02 B01F 7/00 Роторно-пульсационный экстрактор с направляющими лопастями [Текст] / А. Н. Потапов ; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – № 2009126346/15 ; заявл. 08.07.09 ; опубл. 27.08.10, Бюл. № 24 (II ч.). – 5 с. : ил.
116. Пат. 2354445 Российская Федерация, МПК B01F 7/00 Акустический способ обработки жидкотекучих сред и роторно-пульсационный акустический аппарат для его осуществления[Текст] / В. М. Фомин ; заявитель и патентообладатель В.М.Фомин – № 2007132601/15 ; заявл. 29.08.07 ; опубл. 10.05.09, Бюл. № 13 (II ч.). – 24 с. : ил.

117. Пат. 2445143 Российская Федерация, МПК В01D 11/02 В01F 7/00 Роторно-пульсационный экстрактор с промежуточной обработкой продукта [Текст] / А. Н. Потапов; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности – № 2010132595 ; заявл. 03.08.10 ; опубл. 20.03.12, Бюл. № 8 (II ч.). – 5 с. : ил.

118. Пат. 2342985 Российская Федерация, МПК В01F 7/28 А01J 11/16 Устройство для смешивания жидкостей разной вязкости [Текст] / М. В. Запевалов; заявитель и патентообладатель ООО «Научно- производственная фирма «Агроресурсы» – № 2007110207/15 ; заявл. 21.03.07 ; опубл. 10.01.09, Бюл. № 1 (II ч.). – 8 с. : ил.

119. Пат. 2354461 Российская Федерация, МПК В06В 1/20 Генератор кавитационных процессов [Текст] / С. П. Лесков; заявитель и патентообладатель С.П. Лесков– № 2007126127/28; заявл. 09.07.07; опубл. 10.05.09, Бюл. № 13 (II ч.). – 6 с.: ил.

120. Пат. на пол. мод. 70154 Российская Федерация, МПК В01F 7/00 Роторно-пульсационный аппарат [Текст] / Н. П. Мидуков ; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров– № 2007127205/22 ; заявл. 16.07.07 ; опубл. 20.01.08, Бюл. № 2 (II ч.). – 1 с. : ил.

121. Пат. на пол. мод. 101657 Российская Федерация, МПК В06В 1/18 Установка гидродинамическая [Текст] / Ю. Л. Дрёмин ; заявитель и патентообладатель Ю.Л. Дрёмин– № 2010126113/28 ; заявл. 25.06.10 ; опубл. 27.01.11, Бюл. № 3 (II ч.). – 2 с. : ил.

122. Пат. на пол. мод. 113173 Российская Федерация, МПК В01F 7/28 Роторный аппарат [Текст] / Н. В. Мотин ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ»– № 2011125510/05 ; заявл. 27.07.11 ; опубл. 10.02.12, Бюл. № 4 (II ч.). – 2 с. : ил.

124. Пат. на пол. мод. 129 840 Российская Федерация, МПК В01F 7/28 Роторно-диспергирующий аппарат [Текст] / Д. Я. Носырев ; заявитель и

патентообладатель Самарский государственный университет путей сообщения— № 2013100928/05; заявл. 09.01.13 ; опубл. 10.07.13, Бюл. № 19 (II ч.). — 2 с. : ил.

125. Pat. US 7066106 United States, int. CL. G10K 7/00 Reverberating mechanical siren/ James Frederick Giebeler; inventor and assignee / James Frederick Giebeler- № 10/409002 filed. Apr. 8, 2003; date of patent Jun. 27, 2006. — 8 pages.

126. Пат. на пол. мод. 92361 Российская Федерация, МПК B01F 7/00 B01F 5/06 Регулируемый роторно-пульсационный аппарат [Текст] / Л. А. Климов ; заявитель и патентообладатель Е.В. Игнатьев— № 2008121845/22 ; заявл. 02.06.08 ; опубл. 20.03.10, Бюл. № 8 (II ч.). — 2 с. : ил.

127. Пат. на пол. мод. 106849 Российская Федерация, МПК B01F 7/26 Устройство роторно-пульсационного аппарата [Текст] / С. Г. Карташов ; заявитель и патентообладатель Российская акад. сельскохоз. наук Госуд. научное учрежд. Всероссийский науч.-исслед. институт электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохоз. наук— № 2011112963/05 ; заявл. 05.04.11 ; опубл. 27.07.11, Бюл. № 21 (II ч.). — 3 с. : ил.

128. Пат. 2448438 Российская Федерация, МПК B01J 19/00 B06B 1/18 B01F 7/00 Устройство для физико-химической обработки жидкой среды [Текст] / С. В. Мищенко; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет— № 2011128251/05 ; заявл. 07.07.11 ; опубл. 27.07.13, Бюл. № 21 (II ч.). — 7 с. : ил.

129. Пат. 2398624 Российская Федерация, МПК B01F 7/28 Роторный аппарат [Текст] / В. М. Червяков; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет— № 2008145924/15; заявл. 20.11.08 ; опубл. 10.09.10, Бюл. № 25 (II ч.). — 8 с. : ил.

130. Пат. на пол. мод. 128516 Российская Федерация, МПК B01F 3/08 Центробежный гомогенизатор [Текст] / С. В. Лозовая; заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова— № 2012154766/05; заявл. 17.12.12 ; опубл. 27.05.13, Бюл. № 15 (II ч.). — 2 с. : ил.

131. Пат. на пол. мод. 108575 Российская Федерация, МПК F24J 3/00 Роторно-импульсный насос-пастеризатор [Текст] / В. В. Гурков ; заявитель и патентообладатель В.В. Гурков– № 2011116729/06 ; заявл. 27.04.11 ; опубл. 20.09.11, Бюл. № 26 (II ч.). – 2 с. : ил.

132. Пат. на пол. мод. 120017 Российская Федерация, МПК B01F 7/28 Роторно-пульсационный аппарат[Текст] / В. И. Мурко ; заявитель и патентообладатель Сибирский государственный индустриальный университет– № 2012112766/05; заявл. 02.04.12 ; опубл. 10.09.12, Бюл. № 25 (II ч.). – 1 с. : ил.

133. Пат. на пол. мод. 89677 Российская Федерация, МПК F24J 3/00 Теплопарогенератор [Текст] / С. А. Терёшин ; заявитель и патентообладатель С.А. Терёшин– № 2008128059/22; заявл. 09.07.08 ; опубл. 10.12.09, Бюл. № 34(II ч.).–2с.

134. Pat. US 6502980 United States, int. CL. B01F 7/04 In- line homogenizer using rotors and stators in a housing for creating emulsions, suspensions and blends/ David R; inventor and assignee David R./ Bematek Systems Inc- № 09/834829; filed. Apr. 13, 2001; date of patent Jan. 7, 2003. – 7 pages.

135. Пат. 23774775 Российская Федерация, МПК F24J 3/00 Кавитационный реактор [Текст] / В. М. Дворников; заявитель и патентообладатель В. М. Дворников – № 2006103509/06; заявл. 27.08.07 ; опубл.27.12.09,Бюл.№36(II ч.).–6с.

136. Пат. 2357791 Российская Федерация, МПК B01F 7/00 Роторный гидродинамический кавитационный аппарат [Текст] / А. Д. Петраков; заявитель и патентообладатель А. Д. Петраков, – № 2007143408/15; заявл. 22.11.07; опубл. 10.06.09, Бюл. № 16 (II ч.). – 11 с.

137. Пат. на пол. мод. 113672 Российская Федерация, МПК B01F 11/02 Устройство непрерывного действия для подготовки котельного биотоплива [Текст] / Ю. А. Кожевников; заявитель и патентообладатель ГНУ ВИЭСХ РОССЕЛЬХОЗАКАДЕМИИ– № 2011144411/05; заявл. 03.11.11 ; опубл. 27.02.12, Бюл. № 6 (II ч.). – 2 с. : ил.

138. Пат. на пол. мод. 94482 Российская Федерация, МПК B01F 7/00 Гомогенизатор для тяжелых топлив [Текст] /В. И. Левчук; заявитель и

патентообладатель В. И. Левчук – № 2010103476/22; заявл. 02.02.10 ; опубл. 27.05.10, Бюл. № 15 (II ч.). – 2 с. : ил.

139. Pat. US 2010/0260008 United States, int. CL. B01F 13/08 Rotor- stator- device for dispersing or homogenizing/ Uwe Grimm; inventor and assignee / Uwe Grimm./ IKA- Werke GmbH & Co. KG- № 12/42528; filed. Nov. 3, 2008; date of patent May. 12, 2010. – 7 pages.

140. Заяв. на пол. мод. 147138 Российская Федерация, МПК В01F 7/28 Роторный импульсный аппарат [Текст] /М.А. Промтов, А.Ю. Степанов, А.В. Алешин; заявитель и патентообладатель М.А. Промтов – № 2014117787/05; заявл. 30.04.14 ; опубл., Бюл. № 15 (II ч.). – 2 с. : ил.

141. Пат. на пол. мод. 130877 Российская Федерация, МПК В01F 7/00 Роторный импульсный аппарат [Текст] / М.А. Промтов, А.Ю. Степанов, А.В. Алешин; заявитель и патентообладатель М.А. Промтов – № 2013107869/05; заявл. 21.02.13 ; опубл. 10.08.13, Бюл. № 22 (II ч.). – 2 с. : ил.

142. Arrojo, S. A Parametrical Study of Disinfection with Hydrodynamic Cavitation / S. Arrojo, Y. Benito, A. Martinez // Science Direct. Ultrasonics Sonochemistry. – 2007. – No. 15. – P. 903–908.

143. Milly, P.J. Inactivation of Food Spoilage Microorganisms by Hydrodynamic Cavitation to Achieve Pasteurization and Sterilization of Fluid Foods / P.J. Milly, R.T. Toledo, M.A. Harrison, D. Armstead // Journal of Food Science. – 2007. – Vol. 72, No. 9. – P. 414–422.

144. Effect of Hydrodynamic Cavitation on Zooplankton: a Tool for Disinfection / Subhash Shivram Sawant et al. // Biochem. Eng. J. – 2008. – No. 42(3). – P. 320–328.

145. Loraine, G. Disinfection of Gram – Negative and Gram – Positive Bacteria using DYNAJETS Hydrodynamic Cavitating Jets / G. Loraine, G. Chahine, C.-T. Hsiao, P. Aley // Ultrasonics and Sonochemistry. – 2012. – No. 19. – P. 710–717.

146. Методы почвенной микробиологии и биохимии: учеб. пособие / под ред. Д.Г. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 304 с.

147. Семенов, С.М. Лабораторные среды для актиномицетов и грибов: справочник / С.М. Семенов. – М.: Агропромиздат, 1990. – 240 с.

Описание программного продукта FlexPDE

FlexPDE выполняет роль вычислительной среды для решения задач, поскольку в этой программе заключен полный набор функций, необходимых для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных:

- функция редактирования для подготовки сценариев,
- генератор сеток конечных элементов,
- функция подбора конечных элементов при поиске решения,
- графическую функцию, чтобы представить график результатов.

FlexPDE не ограничивает пользователя заранее заданным списком прикладных задач или видов уравнений. Выбор вида дифференциальных уравнений в частных производных полностью зависит от пользователя. Язык сценария позволяет пользователю описывать математический аппарат его системы дифференциальных уравнений в частных производных и структуру области решений в целом в естественном формате.

FlexPDE позволяет решать системы дифференциальных уравнения первого или второго порядка в частных производных. Система дифференциальных уравнений может быть стационарной или зависимой от времени. При помощи FlexPDE можно решать задачи о собственных значениях функций. В рамках одной задачи могут быть рассмотрены стационарные и нестационарные уравнения одновременно. Число уравнений в системе, определяется мощностью компьютера, на котором установлен математический пакет FlexPDE. Уравнения могут быть линейными или нелинейными. Математический пакет FlexPDE решает нелинейные системы методом Ньютона - Рафсона.

Может быть задано любое количество геометрических областей для решения с различными свойствами материала. Предполагается, что переменные, описывающие модель, непрерывны на границах раздела сред. FlexPDE

достаточно прост в использовании, и потому представляет ценность для целей образования.

FlexPDE - имеет несколько модулей, для обеспечения решения задач.

1. Модуль редактирования сценария, предоставляет средства для редактирования текста и предварительного просмотра графический результата.

2. Анализатор записи уравнения в виде символов, который преобразует информацию, записанную в виде символов уравнения в набор переменных, параметров и их соотношений, понижает порядок интегрирования. Затем раскладывает эти уравнения матрицу Якоби.

3. Модуль генератора сетки строит сетку треугольных конечных элементов в двумерной области решений. При решении трехмерных задач, двумерная сетка преобразуется в тетраэдрическую, перекрывающую произвольное количество неплоских слоев.

4. Модуль численного анализа конечного элемента осуществляет выбор соответствующей схемы решения для задач стационарных, нестационарных и поиска собственных значений, причем для линейных и нелинейных систем применяются отдельные процедуры расчета.

5. Процедура оценки погрешности оценивает степень приближения сетки и уточняет координаты сетки в областях, где погрешность велика. Система осуществляет итеративное уточнение параметров сетки и решения до тех пор, пока не достигается заданный пользователем уровень погрешности.

6. Модуль графического вывода принимает произвольные алгебраические функции из полученного решения и осуществляет построение графиков контура, поверхности и векторов.

7. Модуль внешнего вывода данных предоставляет возможность распечатки отчетов в виде многих форматов, включая таблицы численных значений, данные сетки конечных элементов, а также в форматах совместимых с программами CDF или TecPlot.

FlexPDE – Постановка задачи.

FlexPDE считывает сценарий в текстовой форме, в котором описываются все характеристики задачи, подлежащие решению. В пакете FlexPDE имеется программа-редактор, с помощью которой можно создать сценарий для данной задачи. Этот сценарий можно отредактировать, запустить расчет, снова отредактировать, и снова произвести расчеты, пока результат не удовлетворит всем требованиям пользователя. Далее сценарий можно сохранить в виде файла для дальнейшего использования или в качестве основы для дальнейших модификаций.

Самый простой путь к постановке задачи состоит в копировании решения для аналогичных задач, которые уже имеются у пользователя. В любом случае, следует определить четыре основных составляющих сценария:

- Определить переменные и уравнения
- Определить область решений и граничные условия
- Определить свойства параметры
- Определить в каком графическом виде, должно быть представлено решение.

FlexPDE - Система обозначений.

В большинстве случаев, нотация в пакете FlexPDE использует обычный текст, как в языках программирования.

Например, дифференцирование обозначается в виде dx (...). Программа различает все названия координат, так же как и обозначения вторых производных dxx (...) и векторных операторов div (дивергенция), $grad$ (градиент), $curl$ (ротор).

FlexPDE - Генерирование Сетки

Команда "run" из программного меню FlexPDE начинает расчеты, автоматически создавая сетку конечных элементов, заполняющую описанную пользователем область решений. В этой сетке размер ячеек определяется расстоянием между отдельными заданными точками на границе области или кривизной дуг. Пользователь может изменять построение сетки при помощи нескольких средств контроля. Они описаны детально в главе " Управление Плотностью Сетки " в разделе Help программы FlexPde.

Таким образом, FlexPDE - гибкая и мощная универсальная программная система для получения числовых решений систем дифференциальных уравнений в частных производных для разработок в физике, химии, биологии, геологии, математике и других научных отраслях [112].

**Сценарий расчета потоков жидкости в одной паре каналов ротора
и статора роторного импульсного аппарата для программы FlexPDE**

```

title 'Kanli rotera i statora'
variables {Пременные}
    u
    v
    p
select
    errlim=5E-3 {Точность вычисления}
    regrid=off {Запрет пересчета сетки}
definitions {вспомогательные параметры}
    T=0.0019 {смещение каналов}
    mu=0.0018 {динамический коэффициент вязкости}
    ro=1000 {плотность}
    nu=mu/ro {кинематических коэффициент вязкости}
    omega=314 {угловая скорость вращения ротора}
    delta=0.001 {Толщина пограничного слоя}
    Qv=4.98 {m3/chas} {Расход жидкости}
    Pr=300000 {Давление ротора}
    Pc=50000 {Давление статора}
    {geometria}
    n =20 {Число каналов}
    zazor=0.0001 {Величина зазора между ротором и статором}
    ap=0.002 {ширина канала ротора }
    ac=0.002 {ширина канала статора}
    H=0.01 {Высота канала}
    Rp=0.1 {Радиус ротора}

```

$L_p=0.01$ {Длина ротора}

$L_c=0.02$ {Длина статора}

$P_o=r_o*R_p*I_p*\omega^2$ {Давление центробежное}

$P_n=P_p+P_o$ {давление суммарное}

$r_{ball}=0.0045$

$cut = 0.0001$ { cut the corners of the obstruction }

$speed2 = u^2+v^2$

$speed = \sqrt{speed2}$ {расчет результирующей скорости}

$visc=r_o/\mu$

$penalty = 100*visc/r_{ball}^2$

equations {Система уравнений}

u: $u*dx(u)+v*dy(u)=-1/r_o*dx(p)+nu*(dxx(u)+dyy(u))$

v: $u*dx(v)+v*dy(v)=-1/r_o*dy(p)+nu*(dxx(v)+dyy(v))$

p: $div(grad(p)) = penalty*(dx(u)+dy(v))$

Boundaries {области пространства, для которых решается система уравнений}

region 1

{построение геометрии в двух мерных декартовых координатах}

start(0,0)

value(u)=0 value(v)=0 load(p) = 0 line to (0+ L_p ,0) bevel(cut) {1-2}

value(u)=0 value(v)=0 load(p)= 0 line to (0+ L_p ,0+ T) bevel(cut) {2-3}

value(u)=0 value(v)=0 load(p) = 0 line to (0+ L_p+L_c ,0+ T) {3-4}

load(u) = 0 value(p) = P_c line to (0+ L_p+L_c ,0+ $T+ap$) {4-5}

value(u)=0 value(v)=0 load(p) = 0 line to (0+ L_p ,0+ $T+ap$) bevel(cut) {5-6}

value(u)=0 value(v)=0 load(p)= 0 line to (0+ L_p ,0+ ap) bevel(cut) {6-7}

value(u)=0 value(v)=0 load(p) = 0 line to (0,0+ ap) {7-8}

load(u)=0 value(p) = P_n {8-1}

line to close

monitors {Вывод результатов расчета}

contour(speed) {контурный график скорости}

plots

grid(x,y) {сетка}

contour(u) { контурный график горизонтальной составляющей скорости }

contour(v) { контурный график вертикальной составляющей скорости}

contour(speed) painted { контурный график суммарной скорости}

vector(u,v) as "flow" { линии тока жидкости}

contour(p) as "Pressure" painted { контурный график давления }

contour(dx(u)+dy(v)) as "Continuity Error" { ошибки расчета }

surface(speed) {график в 3-х мерных декартовых координатах для скорости}

surface(p) { график в 3-х мерных декартовых координатах для давления }

end 236852924

Сценарий расчета потоков жидкости в каналах роторного импульсного аппарата

```

title 'RIA'
select errlim = 0.005 {Точность вычисления}
variables {Пременные}
    u(0.1)
    v(0.01)
    p(1)
definitions {вспомогательные параметры}
    b=-0.0
    c = 5
    p0 = 0.4
    p1=0.04
    l = 4
    Lx = 5          Ly = 1.5
    Gx = 0          Gy = 0
    speed2 = u^2+v^2
    speed = sqrt(speed2) {расчет результирующей скорости}
    dens = 1
    visc = 0.001
    vxx = (p0/(2*visc*(2*Lx)))*(Ly-y)^2
    {-----}
    alf=0.15 {Угол поворота ротора}
    r = 1 {Радиус ротора}
    d = 0.03 {Величина зазора между ротором и статором}
    lp = 0.23 {Длина ротора}
    lc = 0.29 {Длина статора}

```

```

yg = 3.5 {Полный угол канала}
Rk = 1.6 {Радиус камеры}
{Статическое давление}
rt = 0.5 {Радиус трубы}
a = 0.005 {Ширина канала}
H = 0.16 {Высота канала}
rball = 0.25
cut = 0.01 { cut the corners of the obstruction }
penalty = 100*visc/rball^2
Re = globalmax(speed)*(Ly/2)/visc {Число Рейнольдса}
initial values {Начальные значения переменных}
    u = 0.5*vxx  v = 0  p = p0*x/(2*Lx)
equations {Система уравнений}
    u: visc*div(grad(u)) - dx(p) = dens*(u*dx(u) + v*dy(u))
    v: visc*div(grad(v)) - dy(p) = dens*(u*dx(v) + v*dy(v))
    p: div(grad(p)) = penalty*(dx(u)+dy(v))
Boundaries {области пространства, для которых решается система
уравнений}
    region 1
    {построение геометрии в двух мерных декартовых координатах}
    {Потоп}
    start(r*cos(alf+yg*pi/180),r*sin(alf+yg*pi/180))
        value(u) = 0  value(v) = 0  load(p) = 0
        line to ((r+lp)*cos(alf+yg*pi/180),(r+lp)*sin(alf+yg*pi/180))
        ARC ( RADIUS = r+lp ) to ((r+lp)*cos(alf+(45-
yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(45-yg)*pi/180))
        line to (r*cos(alf+(45-yg)*pi/180),r*sin(alf+(45-yg)*pi/180))
        load(u) = 0  load(v) = 0  value(p) = p0
        ARC ( RADIUS = -r ) to
(r*cos(alf+(45+yg)*pi/180),r*sin(alf+(45+yg)*pi/180))

```

value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0

line to

((r+lp)*cos(alf+(45+yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(45+yg)*pi/180))

ARC (RADIUS = r+lp) to ((r+lp)*cos(alf+(90-yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(90-yg)*pi/180))

line to (r*cos(alf+(90-yg)*pi/180),r*sin(alf+(90-yg)*pi/180))

load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p0

ARC (RADIUS = -r) to

(r*cos(alf+(90+yg)*pi/180),r*sin(alf+(90+yg)*pi/180))

value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0

line to

((r+lp)*cos(alf+(90+yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(90+yg)*pi/180))

ARC (RADIUS = r+lp) to ((r+lp)*cos(alf+(135-yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(135-yg)*pi/180))

line to (r*cos(alf+(135-yg)*pi/180),r*sin(alf+(135-yg)*pi/180))

load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p0

ARC (RADIUS = -r) to

(r*cos(alf+(135+yg)*pi/180),r*sin(alf+(135+yg)*pi/180))

value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0

line to

((r+lp)*cos(alf+(135+yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(135+yg)*pi/180))

ARC (RADIUS = r+lp) to ((r+lp)*cos(alf+(180-yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(180-yg)*pi/180))

line to (r*cos(alf+(180-yg)*pi/180),r*sin(alf+(180-yg)*pi/180))

load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p0

ARC (RADIUS = -r) to

(r*cos(alf+(180+yg)*pi/180),r*sin(alf+(180+yg)*pi/180))

value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0

line to

((r+lp)*cos(alf+(180+yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(180+yg)*pi/180))

```

      ARC ( RADIUS = r+lp ) to ((r+lp)*cos(alf+( 225-
yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+( 225-yg)*pi/180))
      line to (r*cos(alf+( 225-yg)*pi/180),r*sin(alf+( 225-yg)*pi/180))
      load(u) = 0  load(v) = 0 value(p) = p0
      ARC ( RADIUS = -r ) to
(r*cos(alf+(225+yg)*pi/180),r*sin(alf+(225+yg)*pi/180))
      value(u) = 0  value(v) = 0  load(p) = 0
      line to
((r+lp)*cos(alf+(225+yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(225+yg)*pi/180))
      ARC ( RADIUS = r+lp ) to ((r+lp)*cos(alf+(270-
yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(270-yg)*pi/180))
      line to (r*cos(alf+(270-yg)*pi/180),r*sin(alf+(270-yg)*pi/180))
      load(u) = 0  load(v) = 0 value(p) = p0
      ARC ( RADIUS = -r ) to
(r*cos(alf+(270+yg)*pi/180),r*sin(alf+(270+yg)*pi/180))
      value(u) = 0  value(v) = 0  load(p) = 0
      line to
((r+lp)*cos(alf+(270+yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(270+yg)*pi/180))
      ARC ( RADIUS = r+lp ) to ((r+lp)*cos(alf+( 315-
yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+( 315-yg)*pi/180))
      line to (r*cos(alf+( 315-yg)*pi/180),r*sin(alf+( 315-yg)*pi/180))
      load(u) = 0  load(v) = 0 value(p) = p0
      ARC ( RADIUS = -r ) to
(r*cos(alf+(315+yg)*pi/180),r*sin(alf+(315+yg)*pi/180))
      value(u) = 0  value(v) = 0  load(p) = 0
      line to
((r+lp)*cos(alf+(315+yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+(315+yg)*pi/180))
      ARC ( RADIUS = r+lp ) to ((r+lp)*cos(alf+( 360-
yg)*pi/180),(r+lp)*sin(alf+( 360-yg)*pi/180))
      line to (r*cos(alf+( 360-yg)*pi/180),r*sin(alf+( 360-yg)*pi/180))

```

```

load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p0
      ARC ( RADIUS = -r ) to
(r*cos(alf+yg*pi/180),r*sin(alf+yg*pi/180))
      {_____}
      {Статор}
      start (((r+lp+d)+lc)*cos((45-yg)*pi/180),((r+lp+d)+lc)*sin((45-yg)*pi/180))
      value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0
      line to ((r+lp+d)*cos((45-yg)*pi/180),(r+lp+d)*sin((45-yg)*pi/180))
      ARC ( RADIUS = -(r+lp+d) ) to
((r+lp+d)*cos(yg*pi/180),(r+lp+d)*sin(yg*pi/180))
      line to ((r+lp+d)*cos(yg*pi/180)+lc,(r+lp+d)*sin(yg*pi/180))
      load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p1
      ARC ( RADIUS = -(r+lp+d)-lc ) to (((r+lp+d)+lc)*cos(( 360-
yg)*pi/180),((r+lp+d)+lc)*sin(( 360-yg)*pi/180))
      value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0
      line to ((r+lp+d)*cos(( 360-yg)*pi/180),(r+lp+d)*sin(( 360-
yg)*pi/180))
      ARC ( RADIUS = -(r+lp+d) ) to
((r+lp+d)*cos((315+yg)*pi/180),(r+lp+d)*sin((315+yg)*pi/180))
      line to
(((r+lp+d)+lc)*cos((315+yg)*pi/180),((r+lp+d)+lc)*sin((315+yg)*pi/180))
      load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p1
      ARC ( RADIUS = -(r+lp+d)-lc ) to (((r+lp+d)+lc)*cos(( 315-
yg)*pi/180),((r+lp+d)+lc)*sin(( 315-yg)*pi/180))
      value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0
      line to ((r+lp+d)*cos(( 315-yg)*pi/180),(r+lp+d)*sin(( 315-
yg)*pi/180))
      ARC ( RADIUS = -(r+lp+d) ) to
((r+lp+d)*cos((270+yg)*pi/180),(r+lp+d)*sin((270+yg)*pi/180))

```

line to

$((r+lp+d)+lc)*\cos((270+yg)*\pi/180),((r+lp+d)+lc)*\sin((270+yg)*\pi/180))$

load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p1

ARC (RADIUS = $-(r+lp+d)-lc$) to $((r+lp+d)+lc)*\cos((270-yg)*\pi/180),((r+lp+d)+lc)*\sin((270-yg)*\pi/180))$

value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0

line to $(r+lp+d)*\cos((270-yg)*\pi/180), (r+lp+d)*\sin((270-yg)*\pi/180))$

ARC (RADIUS = $-(r+lp+d)$) to

$(r+lp+d)*\cos((225+yg)*\pi/180), (r+lp+d)*\sin((225+yg)*\pi/180))$

line to

$((r+lp+d)+lc)*\cos((225+yg)*\pi/180),((r+lp+d)+lc)*\sin((225+yg)*\pi/180))$

load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p1

ARC (RADIUS = $-(r+lp+d)-lc$) to $((r+lp+d)+lc)*\cos((225-yg)*\pi/180),((r+lp+d)+lc)*\sin((225-yg)*\pi/180))$

value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0

line to $(r+lp+d)*\cos((225-yg)*\pi/180), (r+lp+d)*\sin((225-yg)*\pi/180))$

ARC (RADIUS = $-(r+lp+d)$) to

$(r+lp+d)*\cos((180+yg)*\pi/180), (r+lp+d)*\sin((180+yg)*\pi/180))$

line to

$((r+lp+d)+lc)*\cos((180+yg)*\pi/180),((r+lp+d)+lc)*\sin((180+yg)*\pi/180))$

load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p1

ARC (RADIUS = $-(r+lp+d)-lc$) to $((r+lp+d)+lc)*\cos((180-yg)*\pi/180),((r+lp+d)+lc)*\sin((180-yg)*\pi/180))$

value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0

line to $(r+lp+d)*\cos((180-yg)*\pi/180), (r+lp+d)*\sin((180-yg)*\pi/180))$

ARC (RADIUS = $-(r+lp+d)$) to

$(r+lp+d)*\cos((135+yg)*\pi/180), (r+lp+d)*\sin((135+yg)*\pi/180))$

```

line to
(((r+lp+d)+lc)*cos((135+yg)*pi/180),((r+lp+d)+lc)*sin((135+yg)*pi/180))
load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p1
ARC ( RADIUS = -(r+lp+d)-lc ) to (((r+lp+d)+lc)*cos(( 135-
yg)*pi/180),((r+lp+d)+lc)*sin(( 135-yg)*pi/180))
value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0
line to ((r+lp+d)*cos(( 135-yg)*pi/180),(r+lp+d)*sin(( 135-
yg)*pi/180))
ARC ( RADIUS = -(r+lp+d) ) to
((r+lp+d)*cos((90+yg)*pi/180),(r+lp+d)*sin((90+yg)*pi/180))
line to
(((r+lp+d)+lc)*cos((90+yg)*pi/180),((r+lp+d)+lc)*sin((90+yg)*pi/180))
load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p1
ARC ( RADIUS = -(r+lp+d)-lc ) to (((r+lp+d)+lc)*cos(( 90-
yg)*pi/180),((r+lp+d)+lc)*sin(( 90-yg)*pi/180))
value(u) = 0 value(v) = 0 load(p) = 0
line to ((r+lp+d)*cos((90-yg)*pi/180),(r+lp+d)*sin((90-yg)*pi/180))
ARC ( RADIUS = -(r+lp+d)) to
((r+lp+d)*cos((45+yg)*pi/180),(r+lp+d)*sin((45+yg)*pi/180))
line to
(((r+lp+d)+lc)*cos((45+yg)*pi/180),((r+lp+d)+lc)*sin((45+yg)*pi/180))
load(u) = 0 load(v) = 0 value(p) = p1
ARC ( RADIUS = -(r+lp+d)-lc ) to (((r+lp+d)+lc)*cos((45-
yg)*pi/180),((r+lp+d)+lc)*sin((45-yg)*pi/180))
monitors
contour(speed) painted report(Re) { контурный график скорости}
contour(p) as "Pressure" painted { контурный график давления}
contour(speed) zoom(-1.5,-1.5,1,1) painted { контурный график суммарной
скорости, увеличение}

```

```

    contour(speed) zoom(0,0,1.6,1.6) painted { контурный график суммарной
скорости, увеличение}
    plots
    contour(u) report(Re) {контурный график горизонтальной составляющей
скорости}
    contour(v) report(Re) { контурный график вертикальной составляющей
скорости}
    contour(speed) painted report(Re) { контурный график суммарной скорости}
    vector(u,v) as "u" report(vxx) {Вектор течения горизонтальной
составляющей скорости }
    contour(speed) zoom(-1.5,-1.5,1,1) painted { контурный график суммарной
скорости, увеличение}
    contour(speed) zoom(0,0,1.6,1.6) painted { контурный график суммарной
скорости, увеличение}
    vector(u,v) as "flow" report(Re) { линии тока жидкости}
    contour(p) as "Pressure" painted { контурный график давления}
    contour(dx(u)+dy(v)) as "Continuity Error" {ошибки расчета }
end    1981537

```

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2010612236
«Программа расчета полей скоростей и давлений потоков жидкости в
каналах роторного импульсного аппарата»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2010612236

**«Программа расчета полей скоростей и давлений в каналах
роторного импульсного аппарата»**

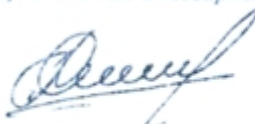
Правообладатель(ли): *Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет» (RU)*

Автор(ы): *Промтов Максим Александрович,
Сундуков Максим Станиславович, Степанов Андрей Юрьевич (RU)*

Заявка № 2010610640
Дата поступления 2 февраля 2010 г.
Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
25 марта 2010 г.



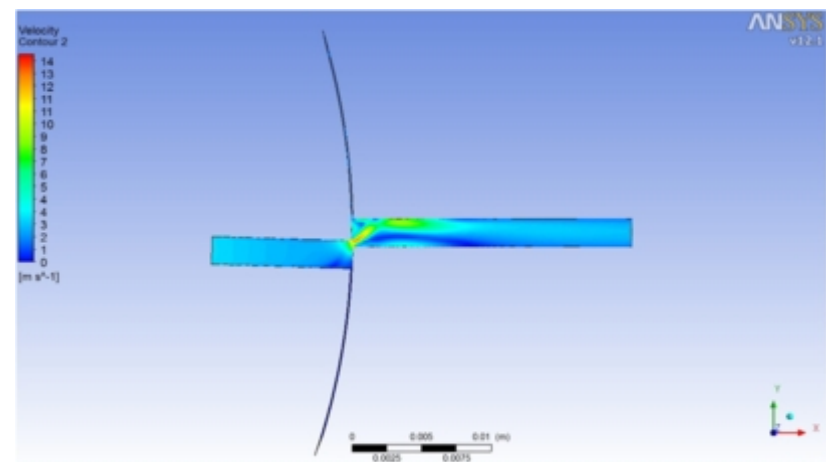
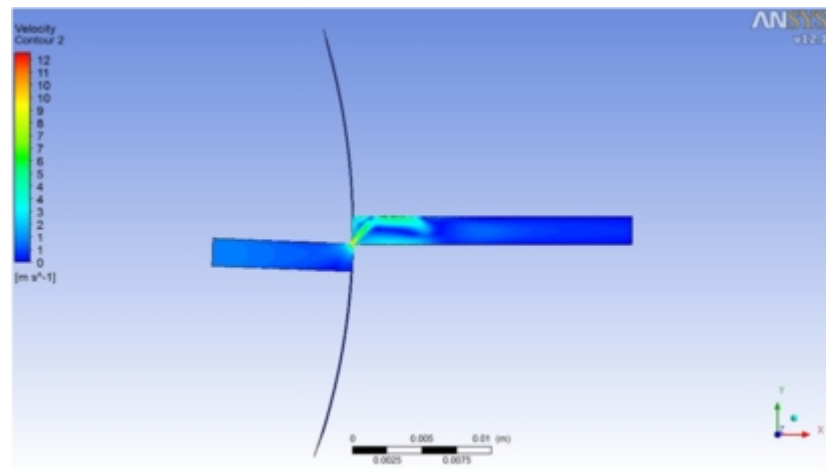
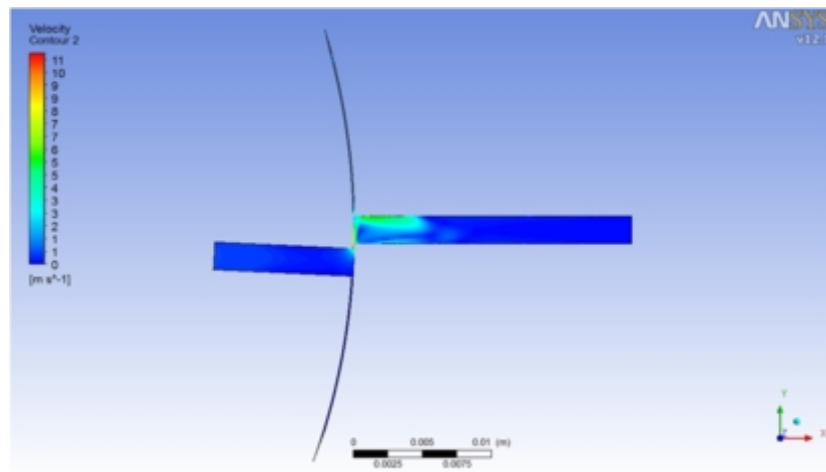
Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

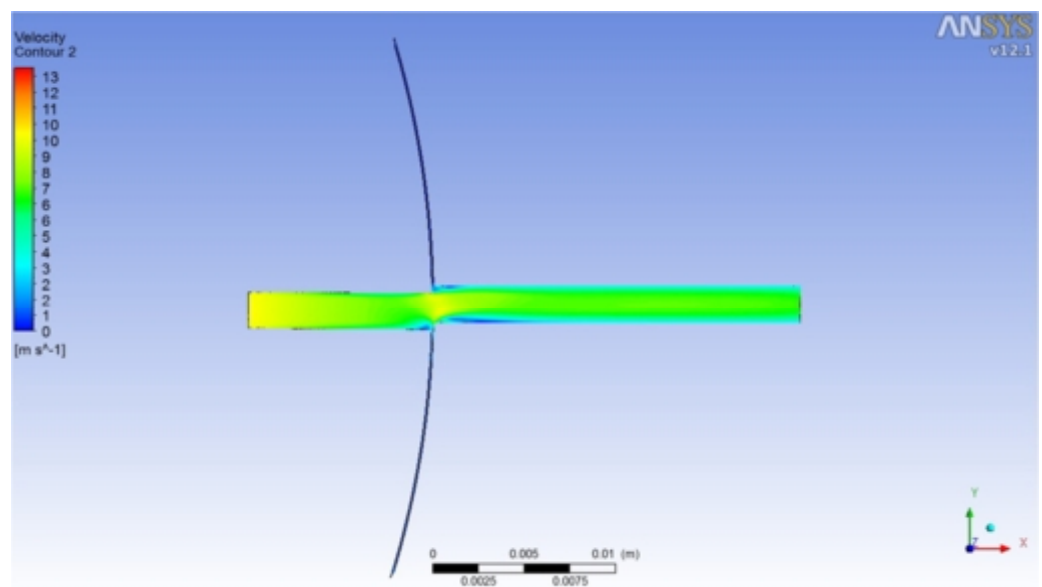
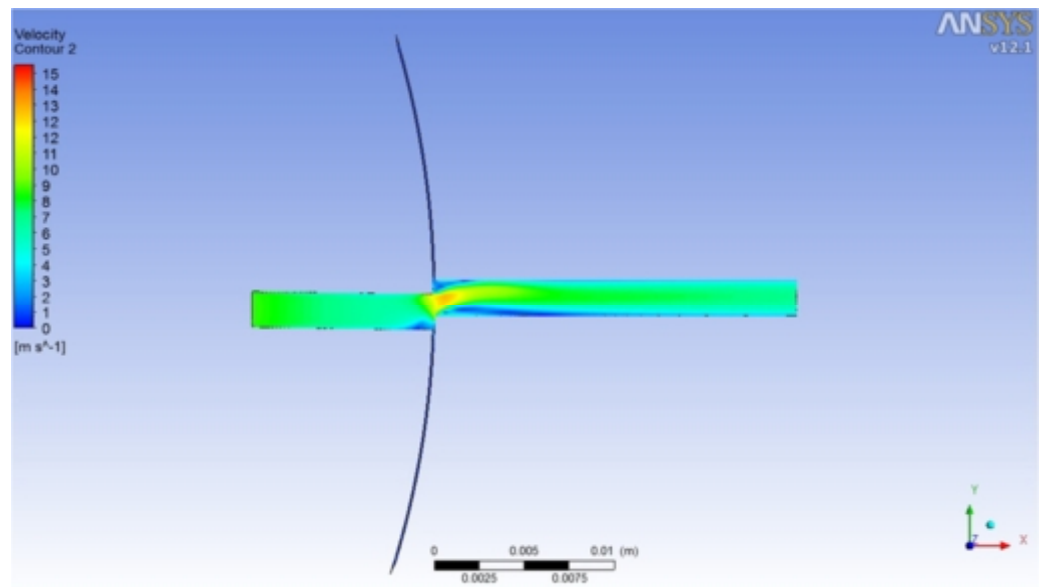
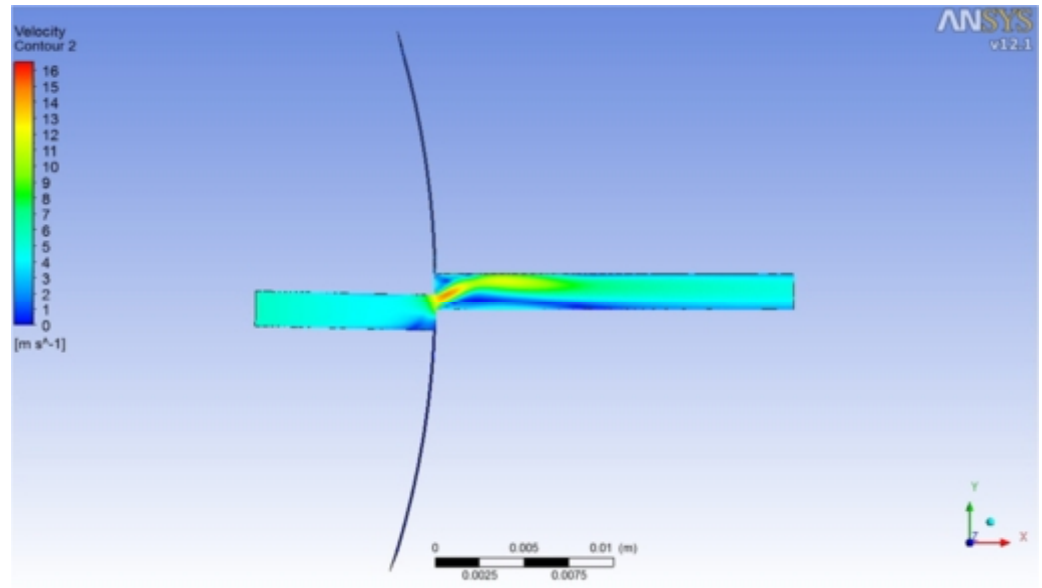


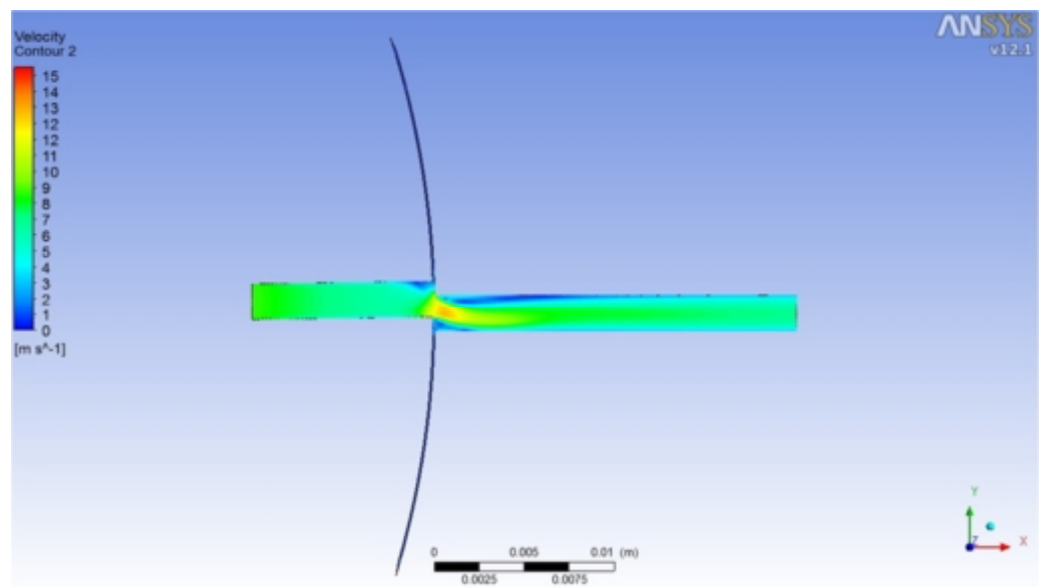
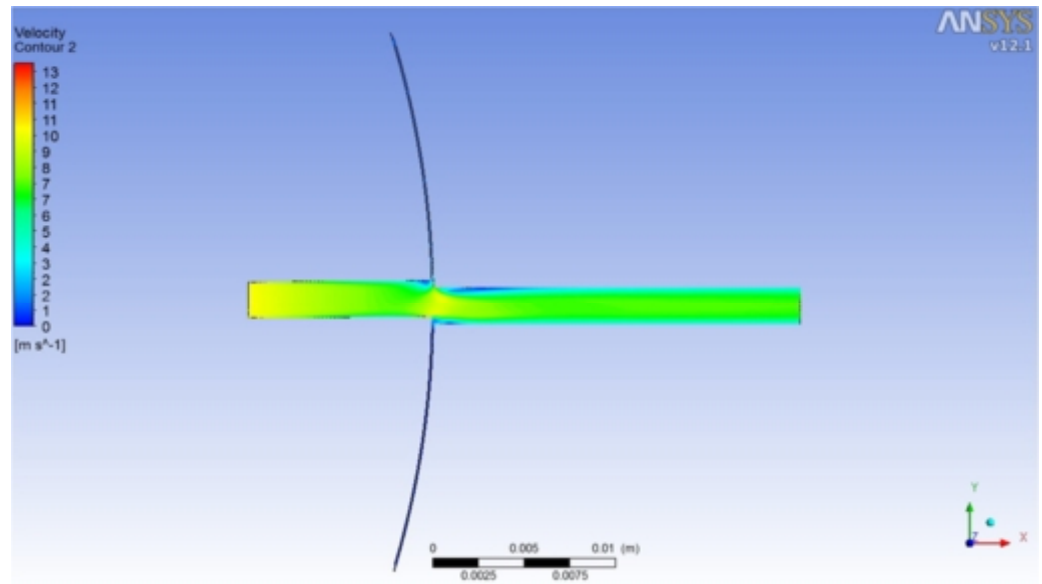
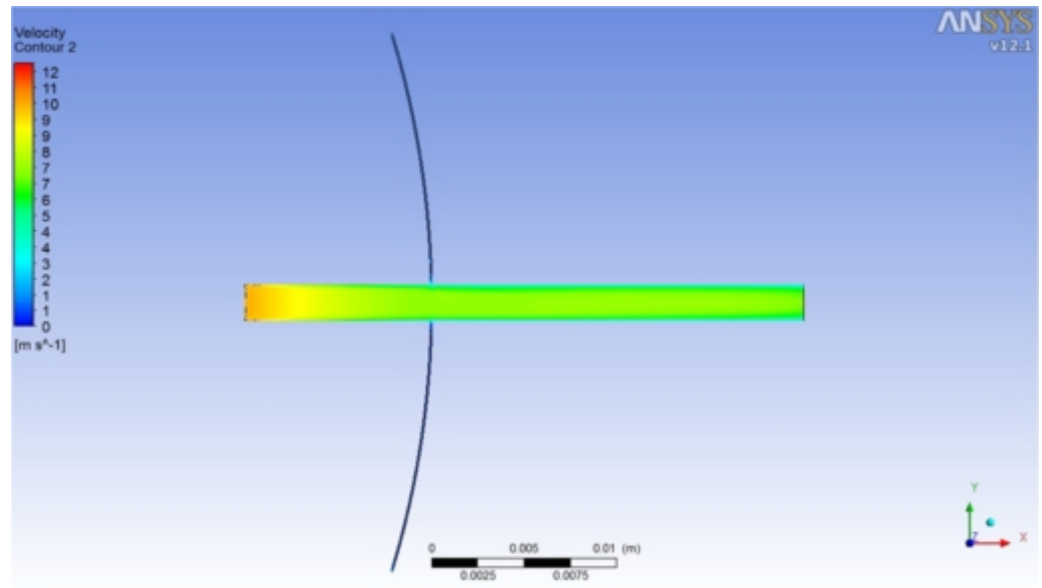
Б.П. Симонов

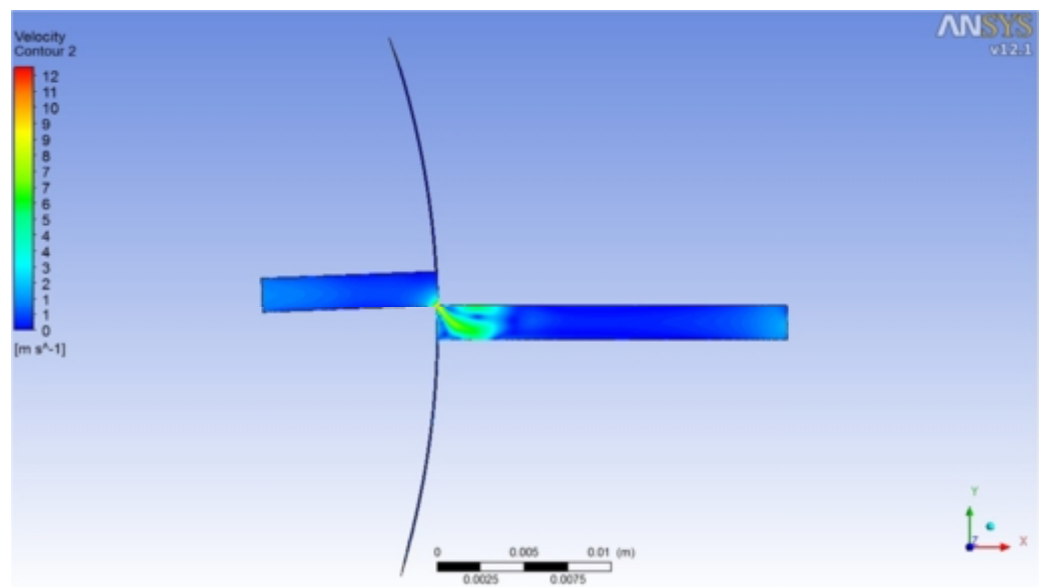
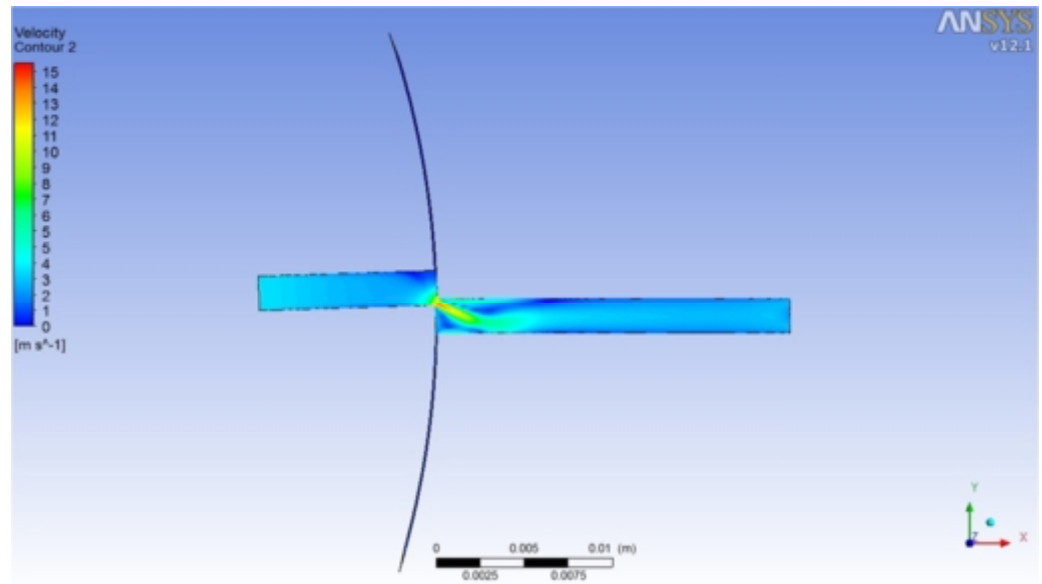
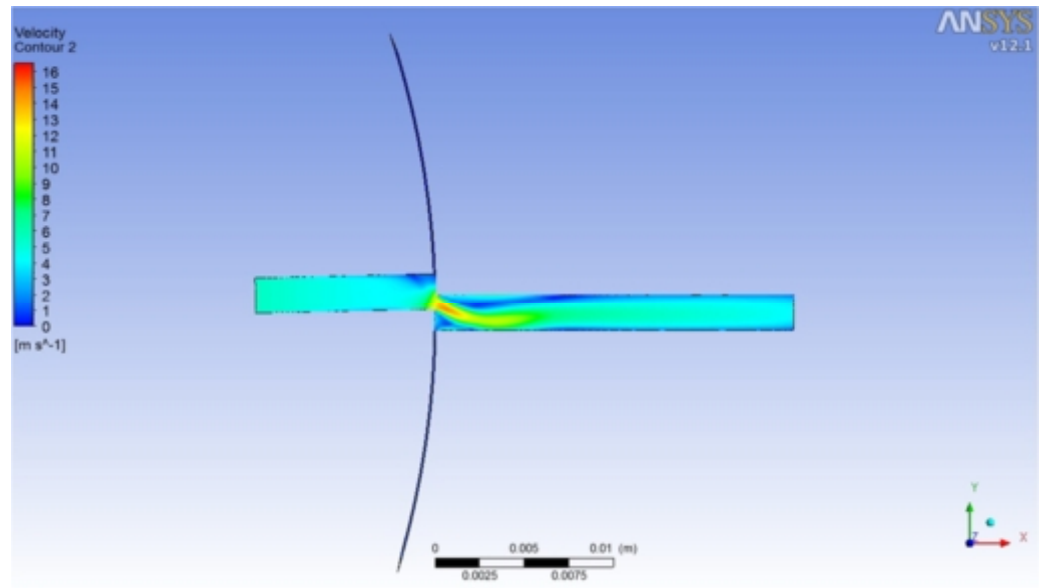
Контурные графики полей скорости и давления в каналах ротора и статора

Контурные графики полей скоростей (м/с) жидкости в каналах РИА при различных положениях ротора относительно статора.

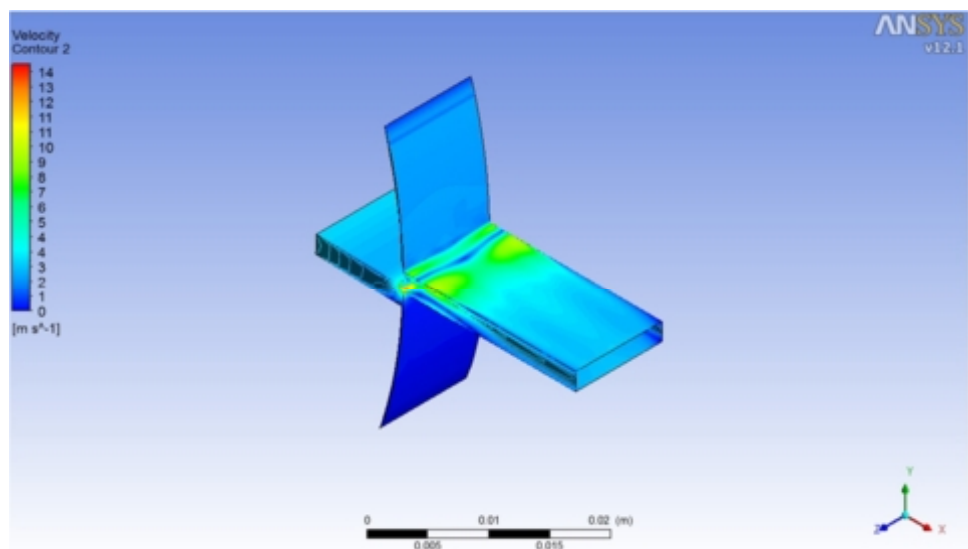
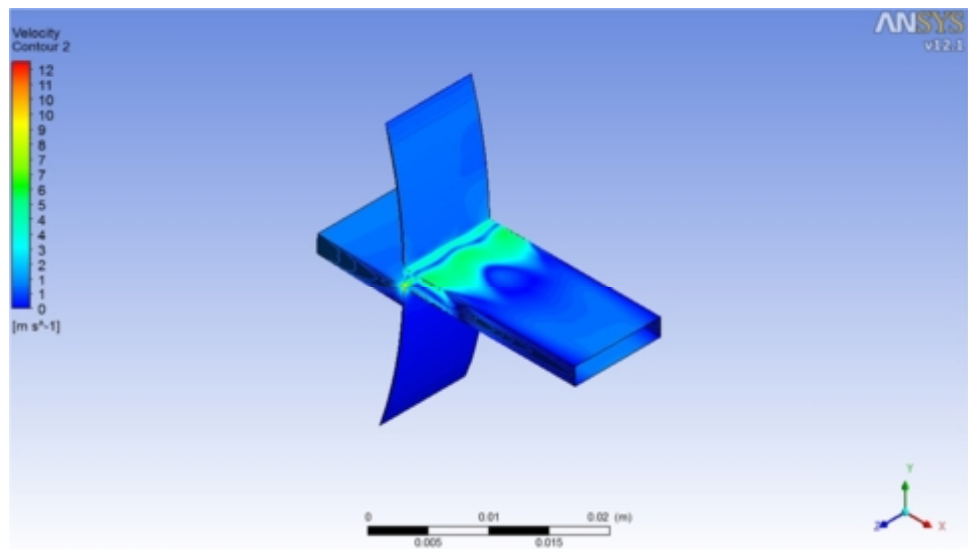
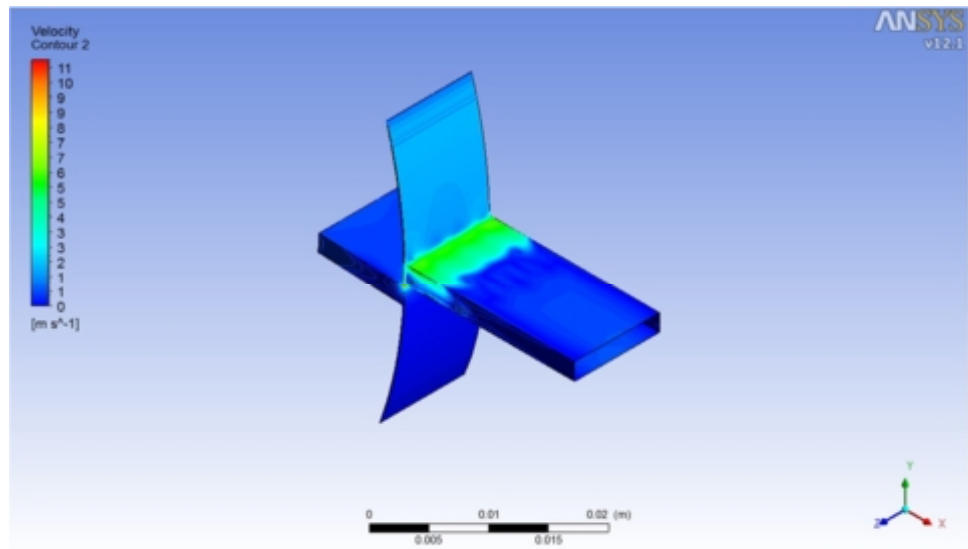


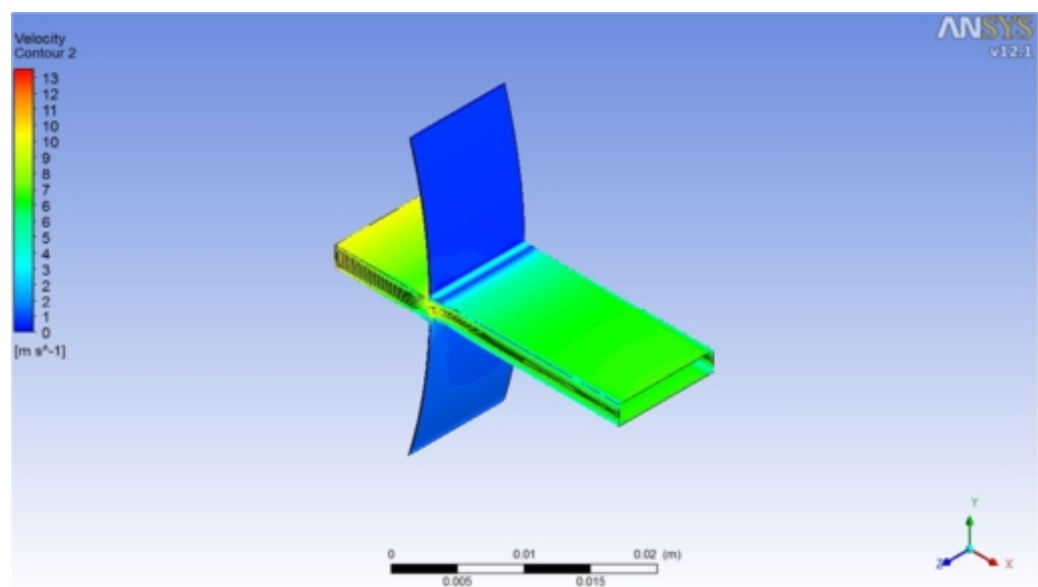
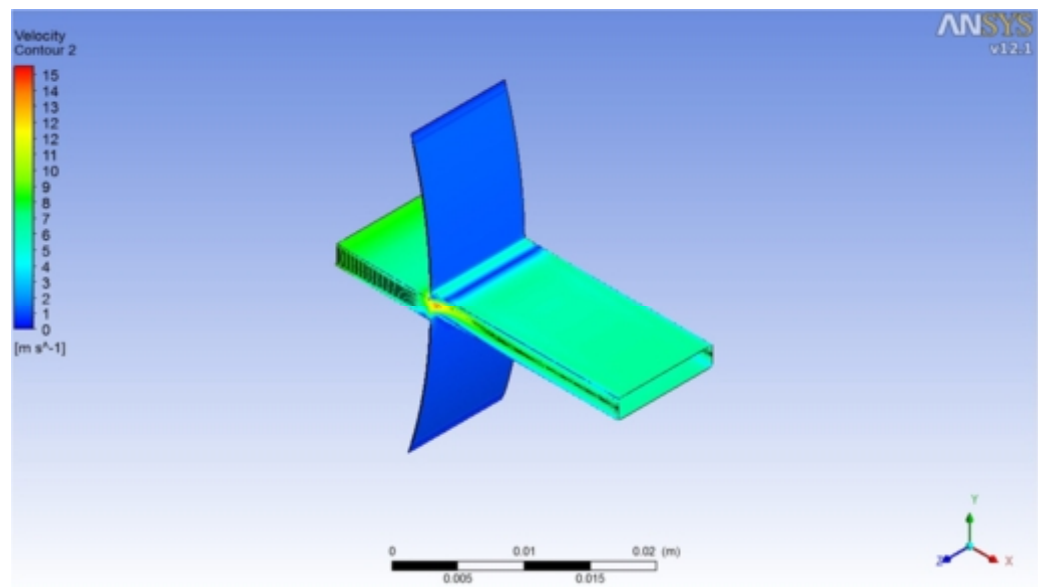
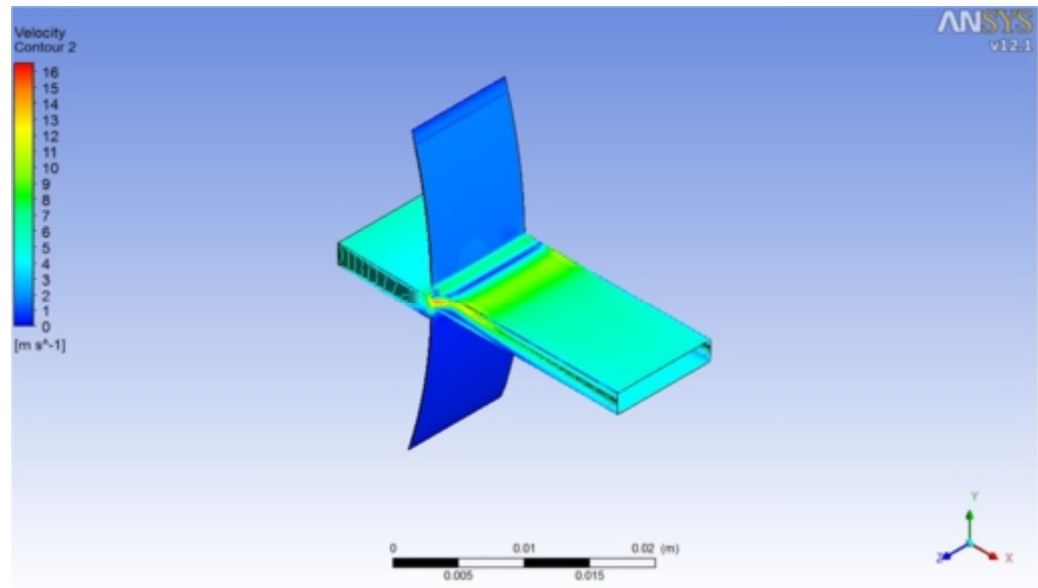


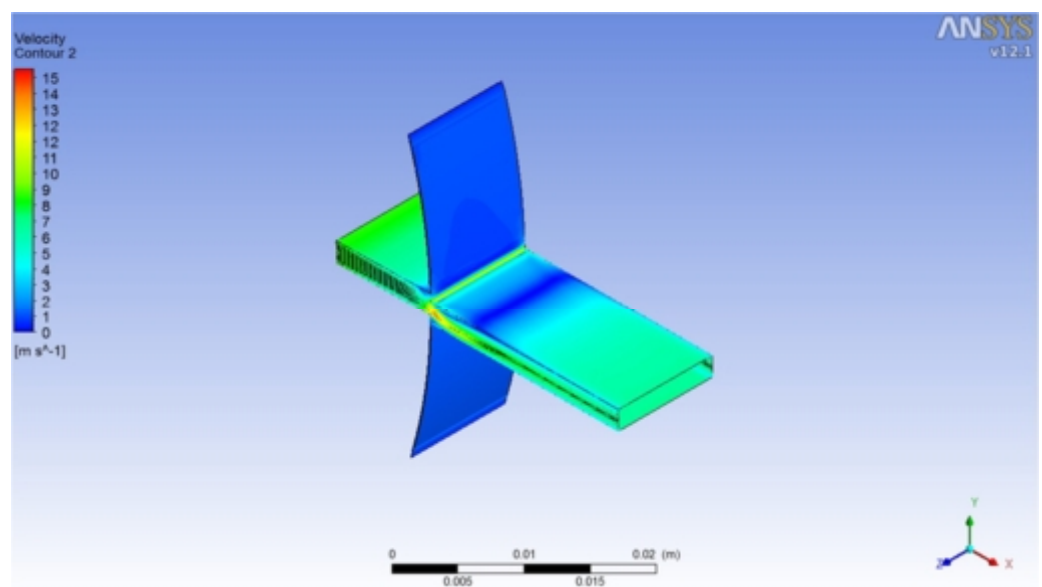
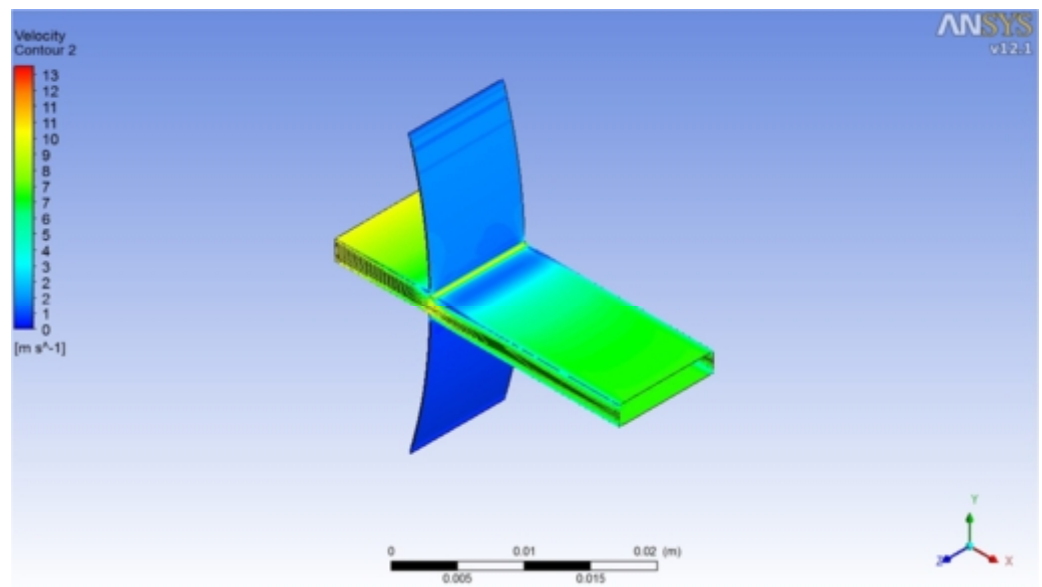
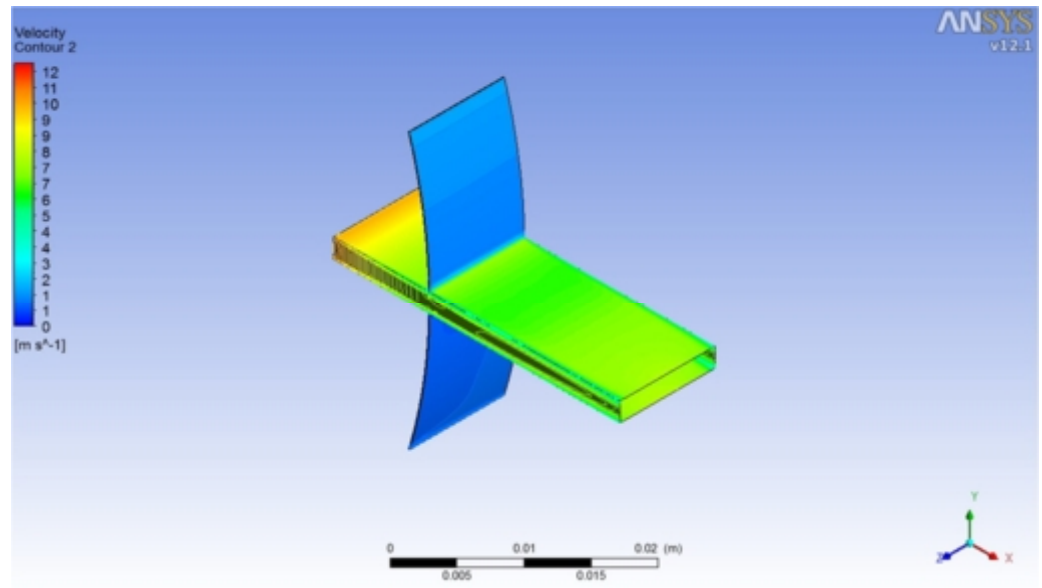


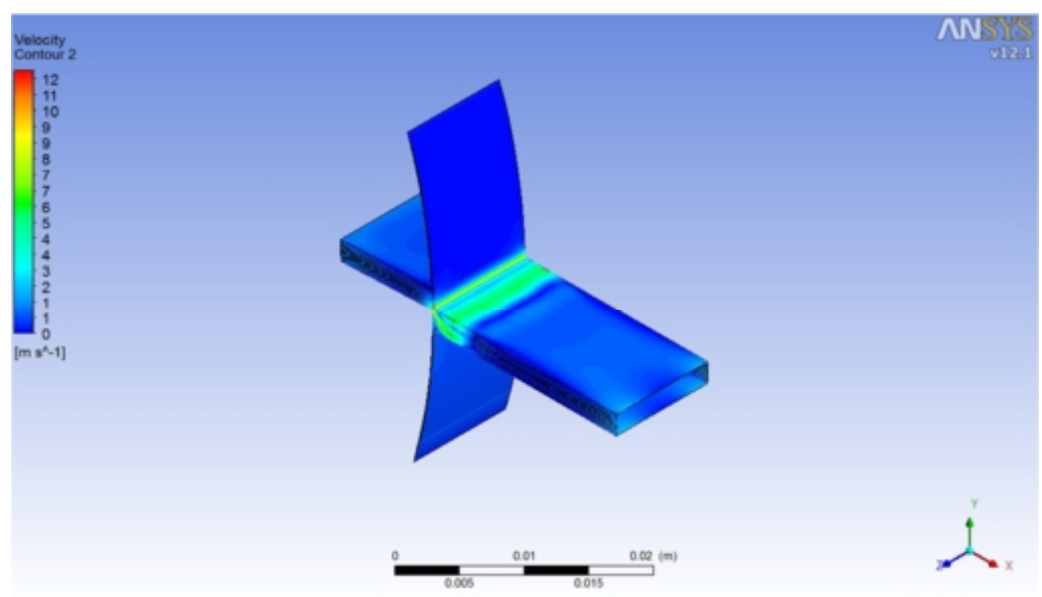
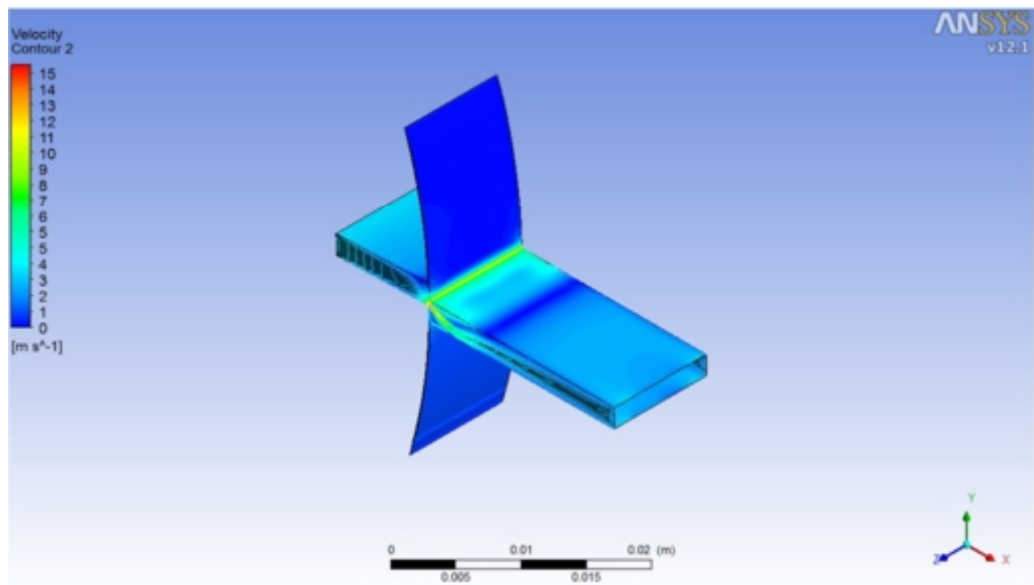
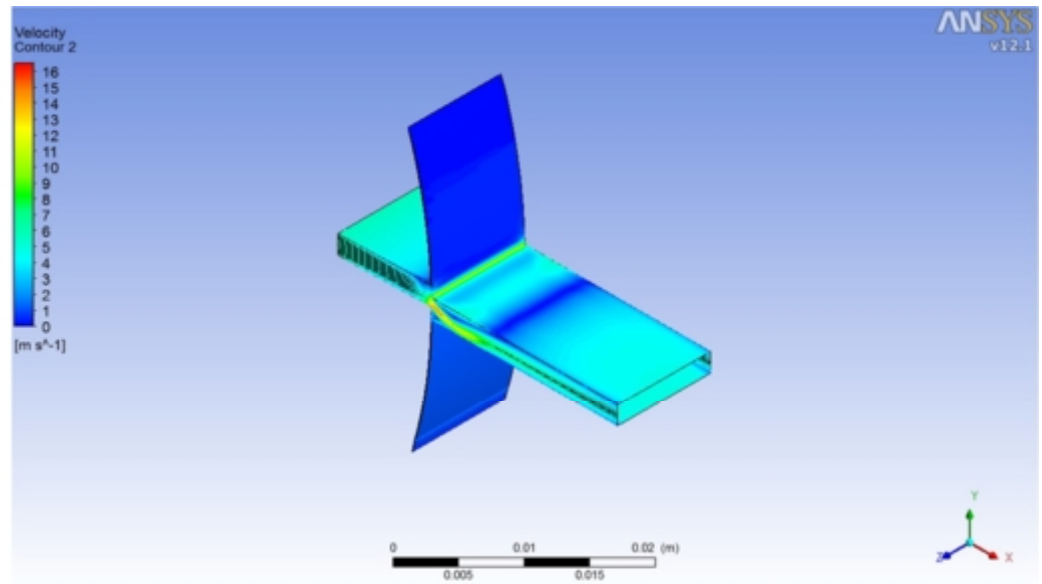


Контурные графики полей скоростей (м/с) жидкости в каналах РИА при различных положениях ротора относительно статора в техмерных координатах

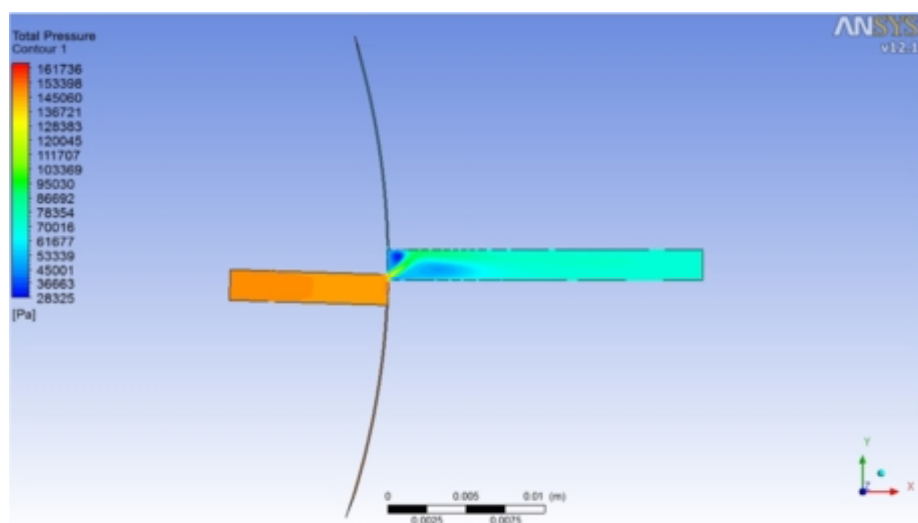
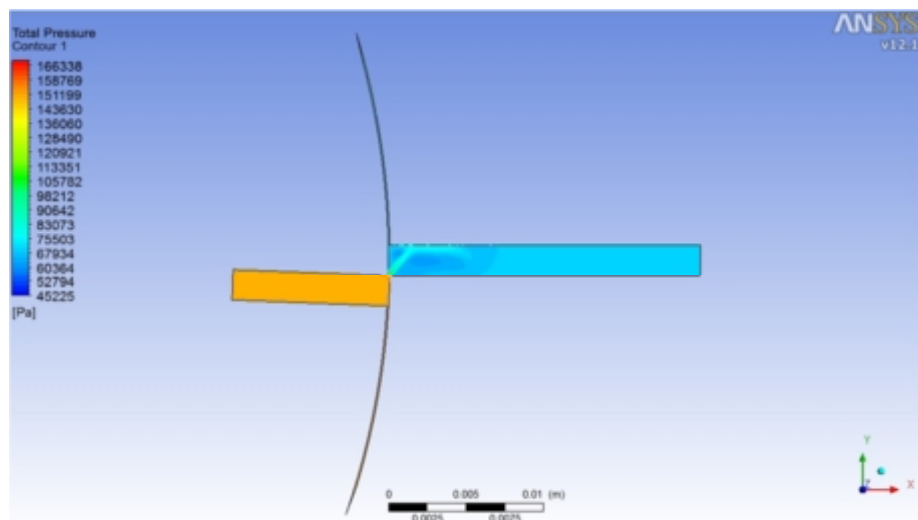
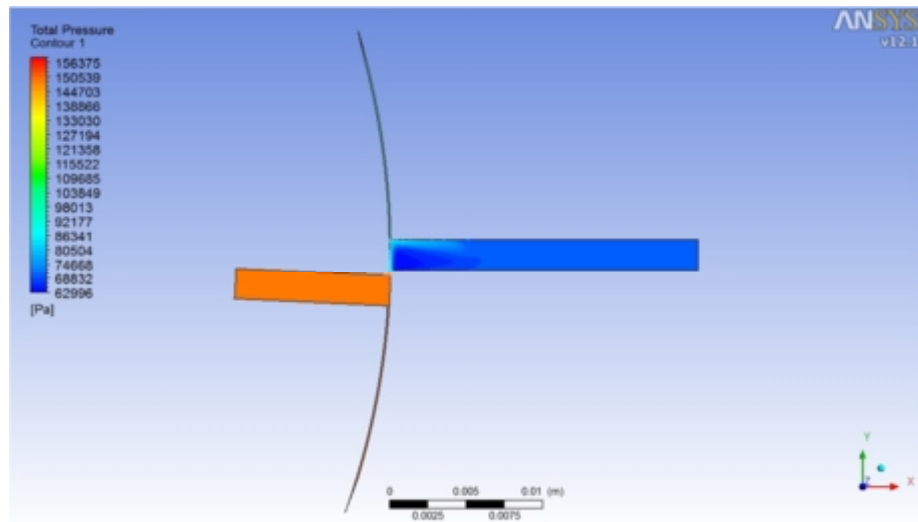


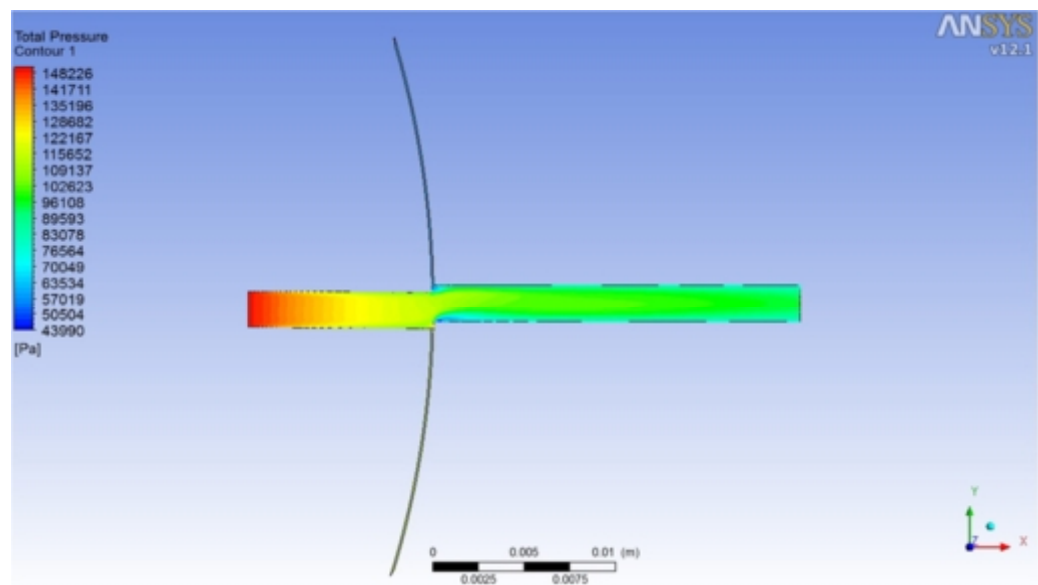
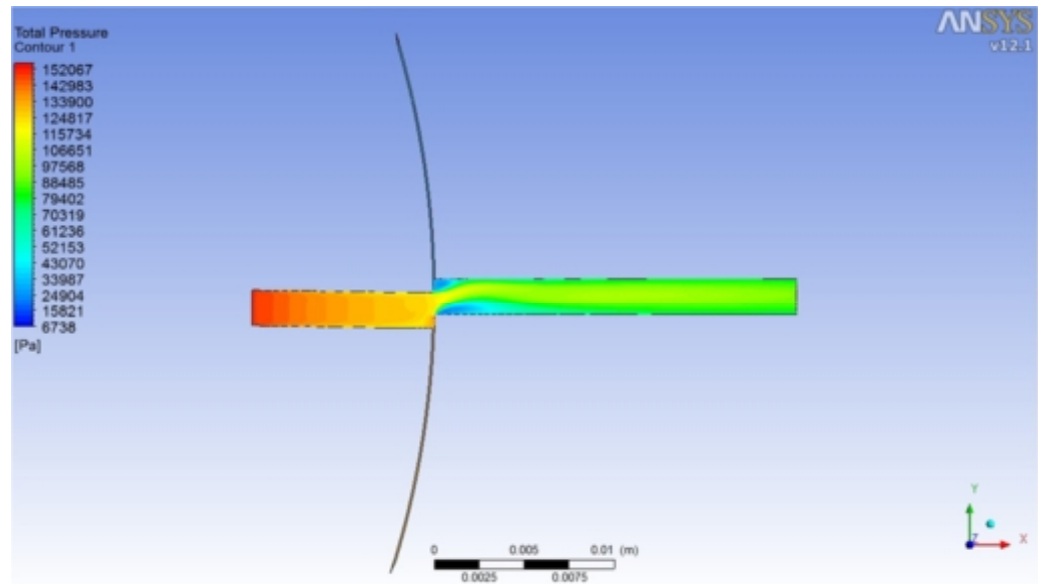
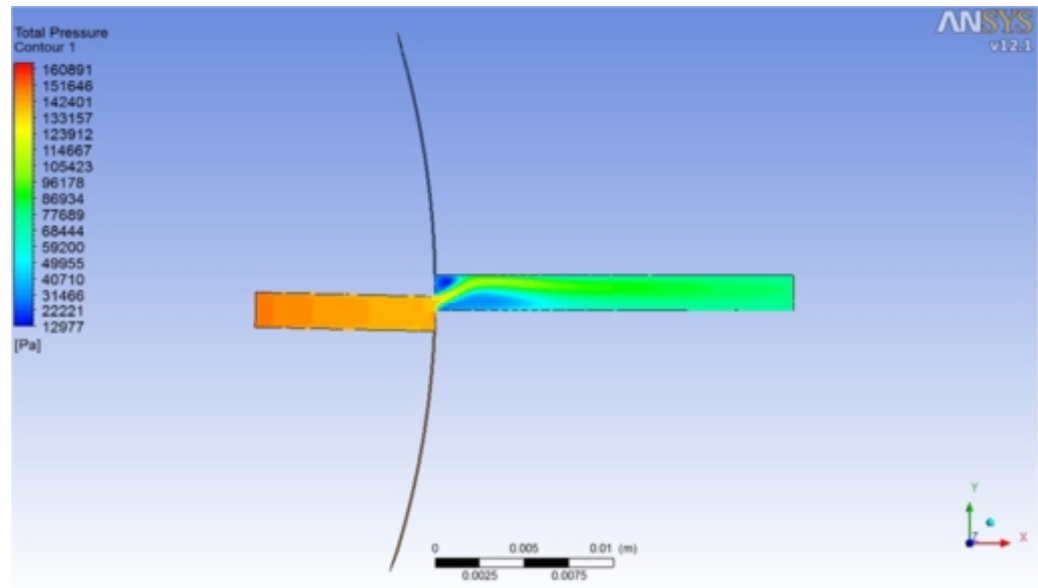


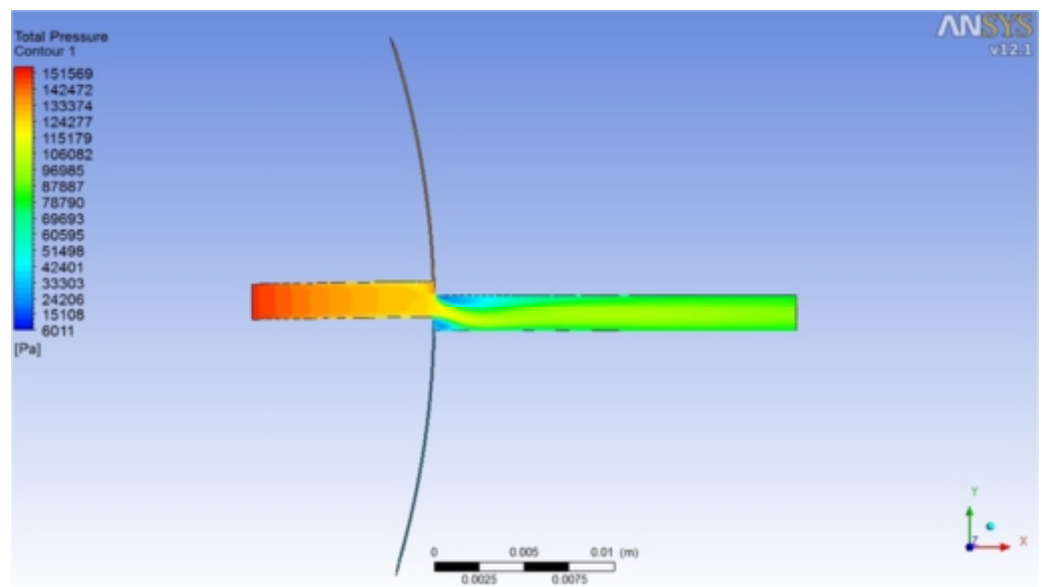
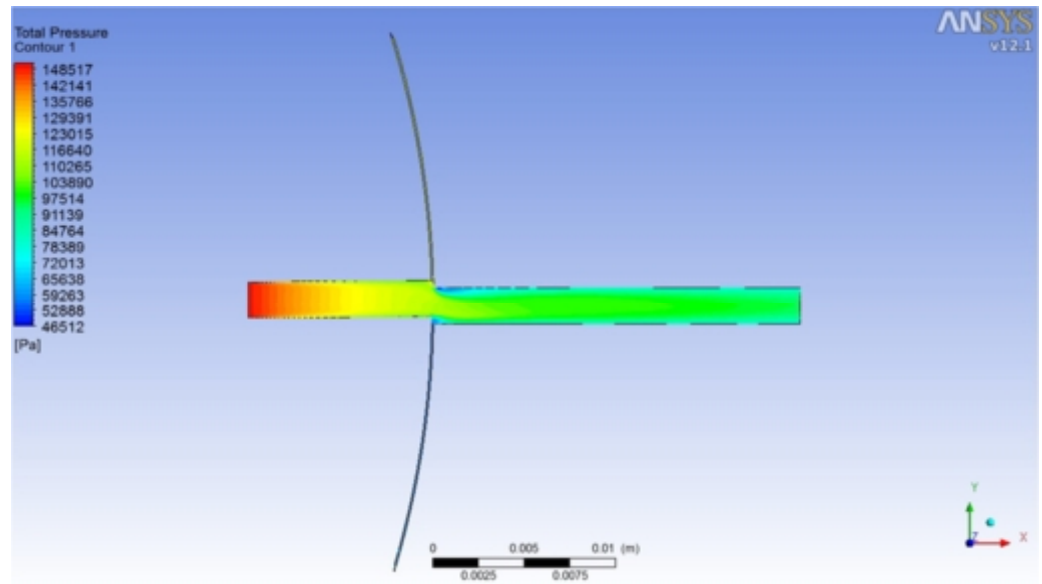
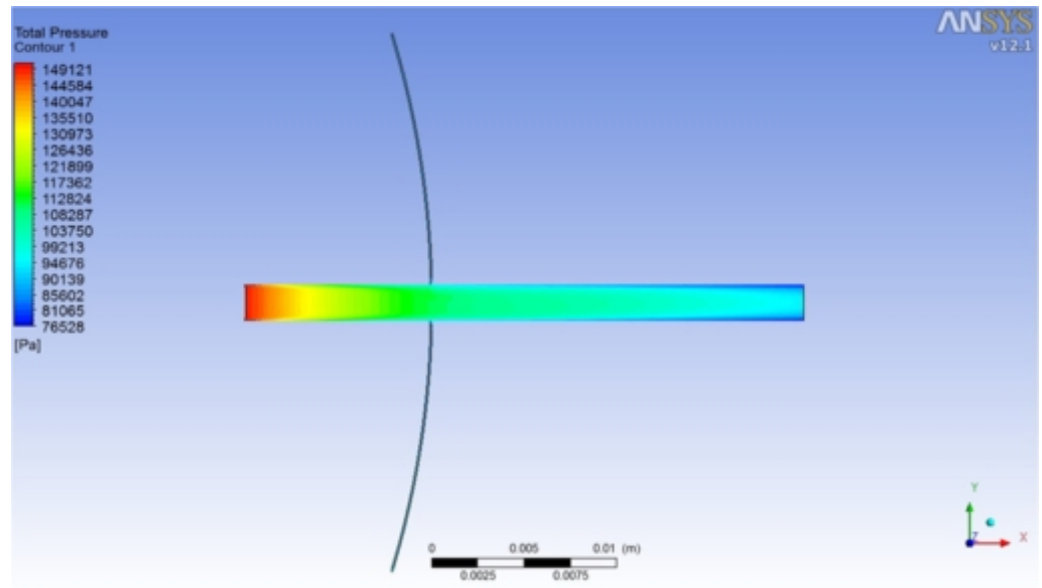


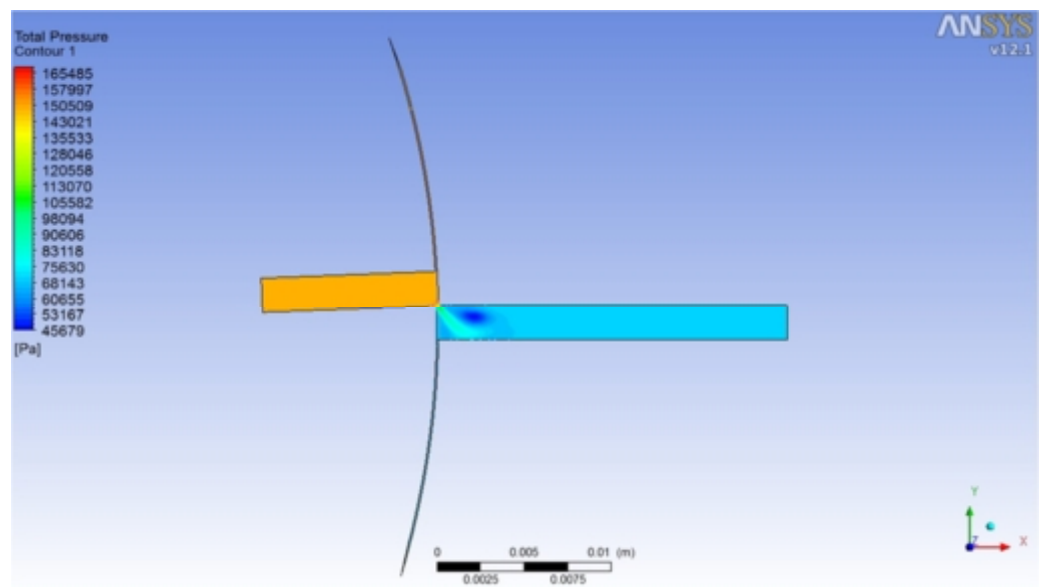
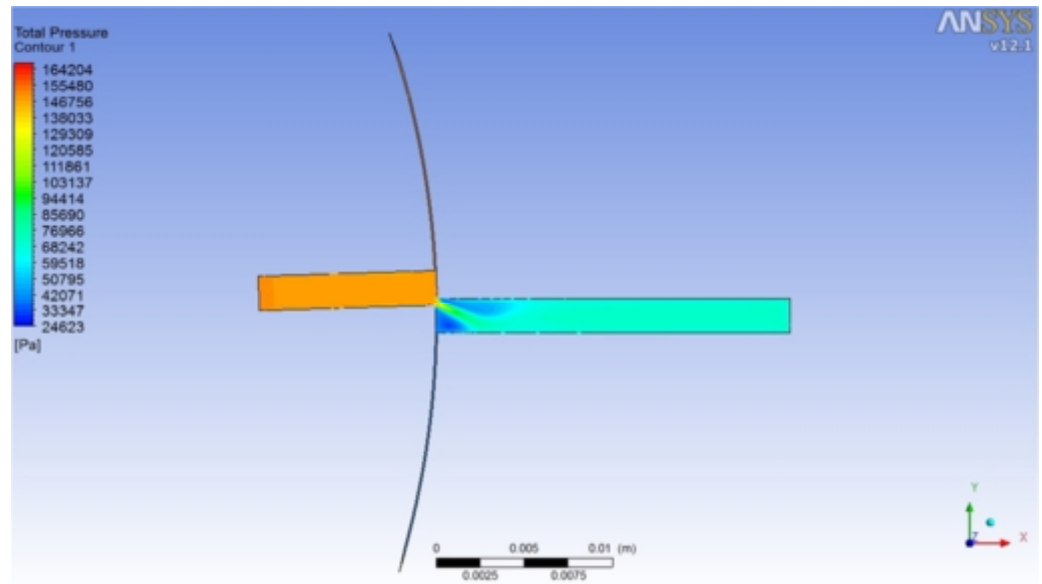
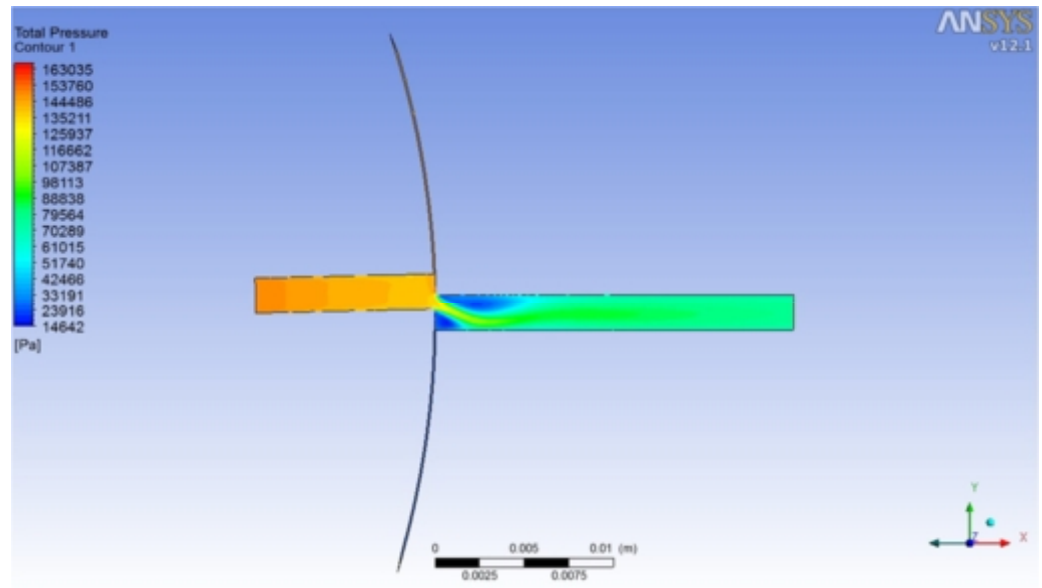


Контурные графики полей давлений (Па) жидкости в каналах РИА при различных положениях ротора относительно статора.

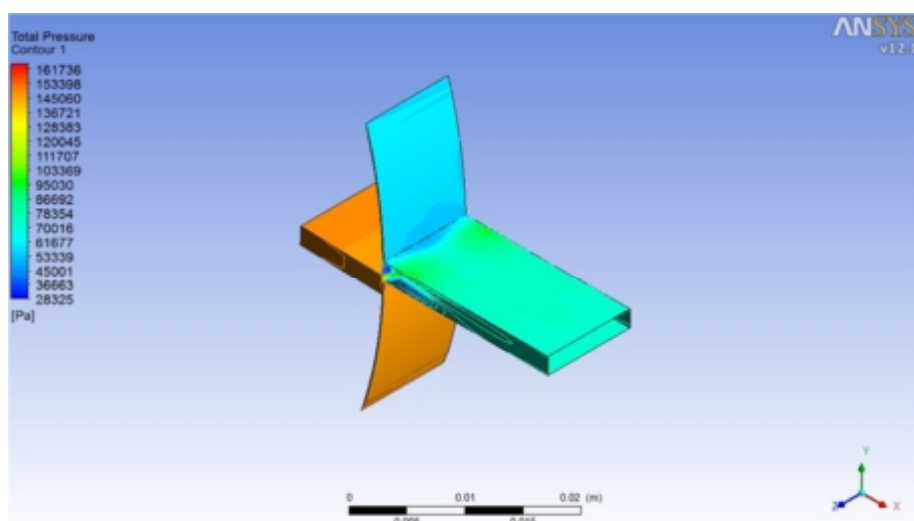
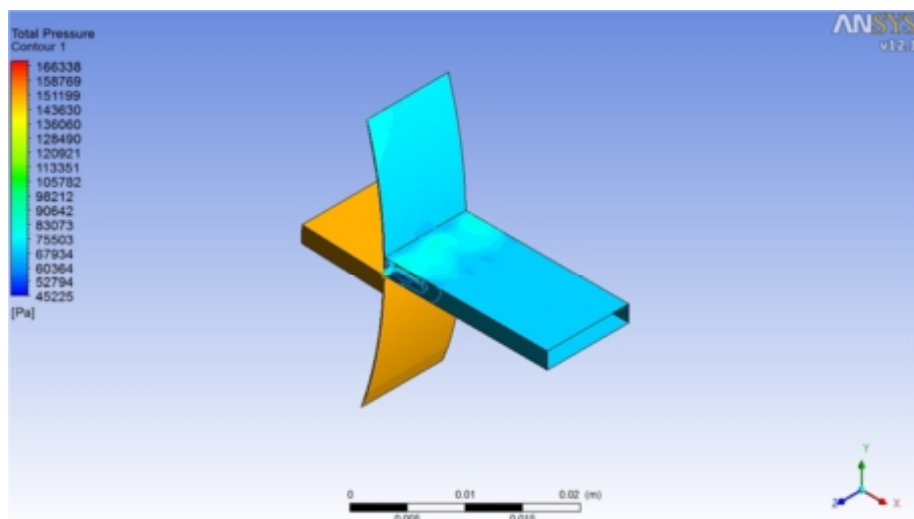
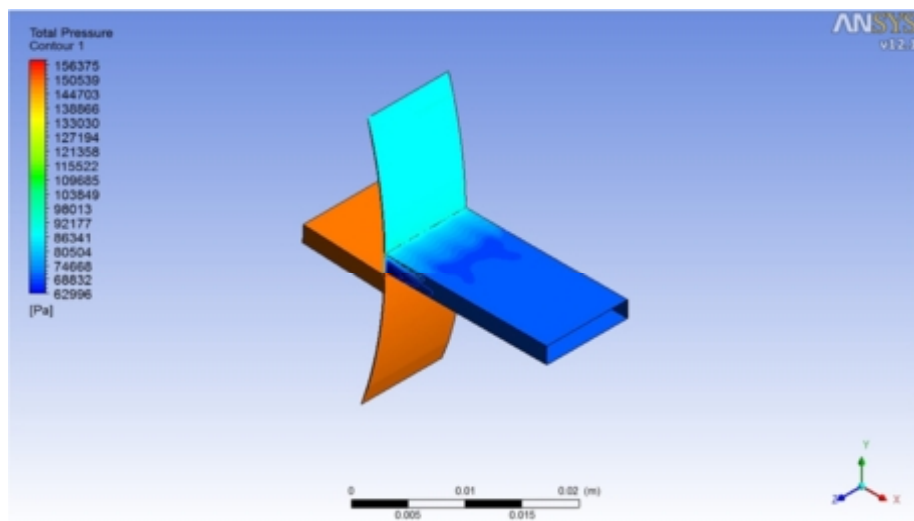


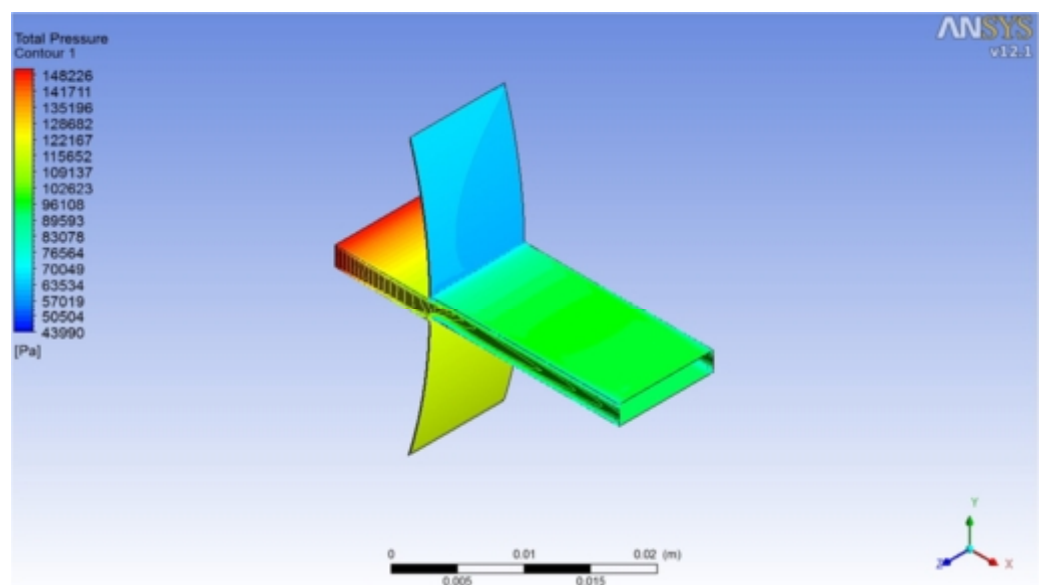
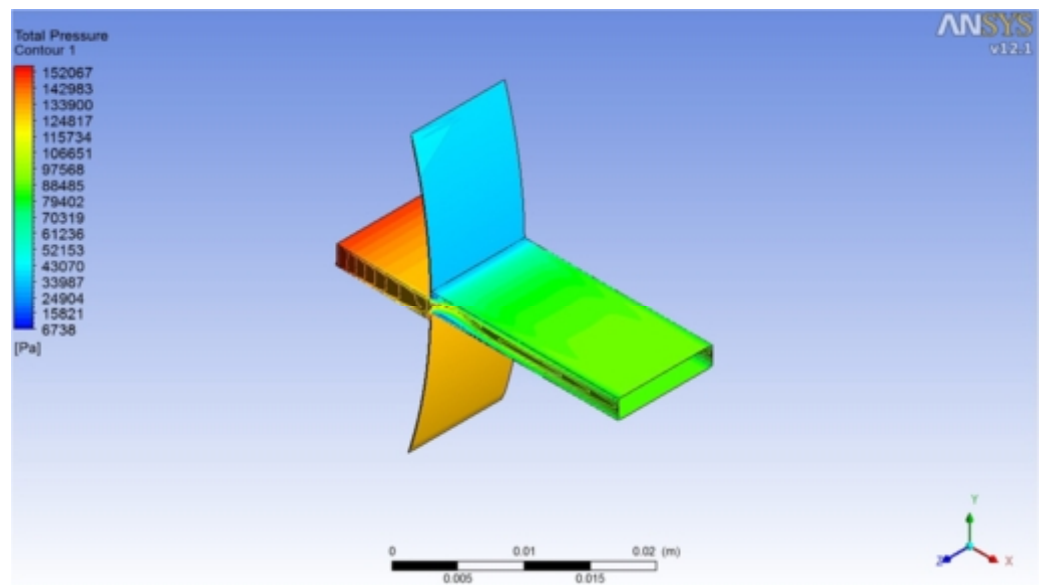
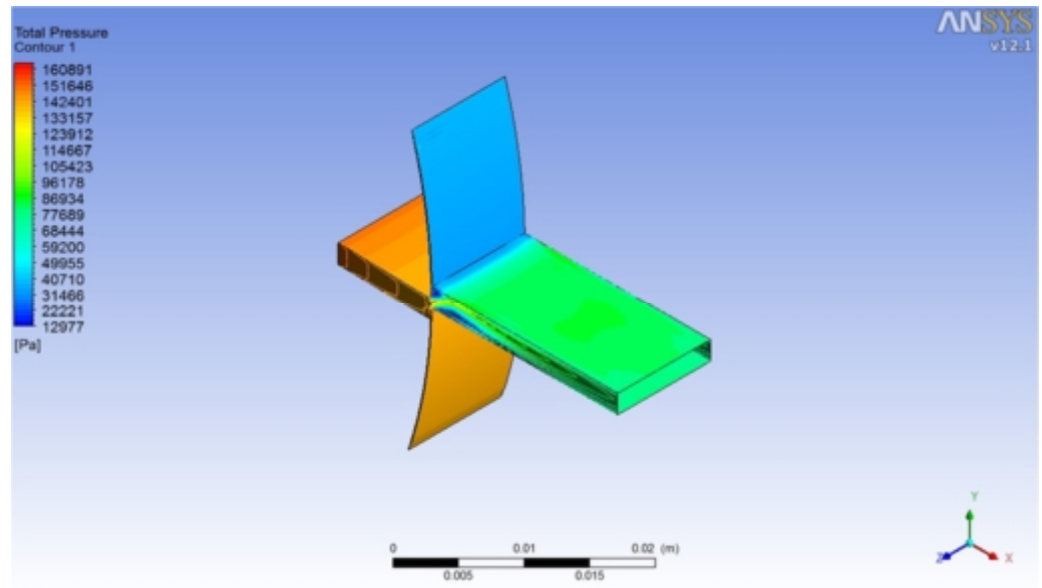


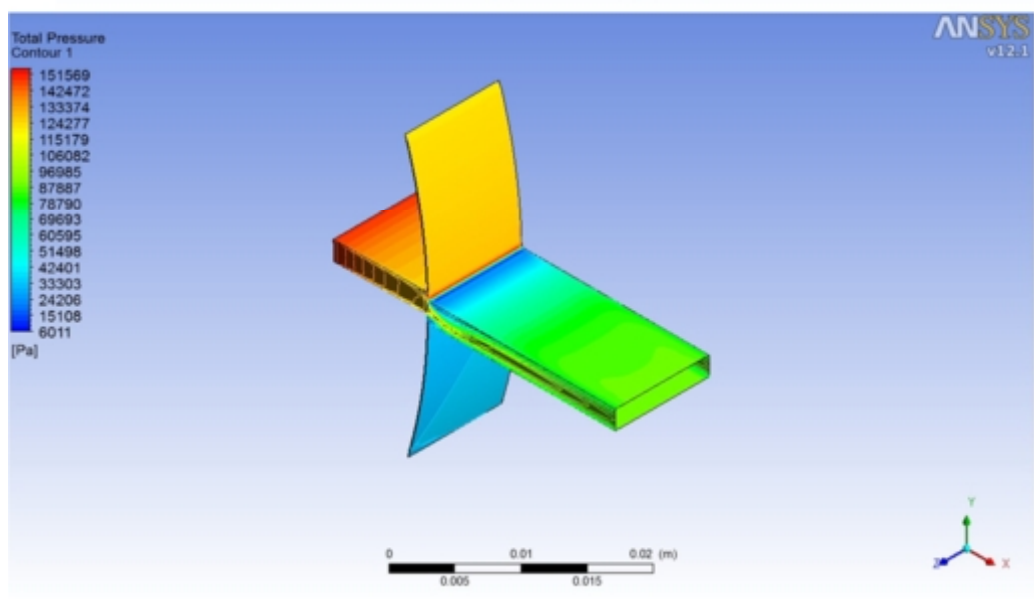
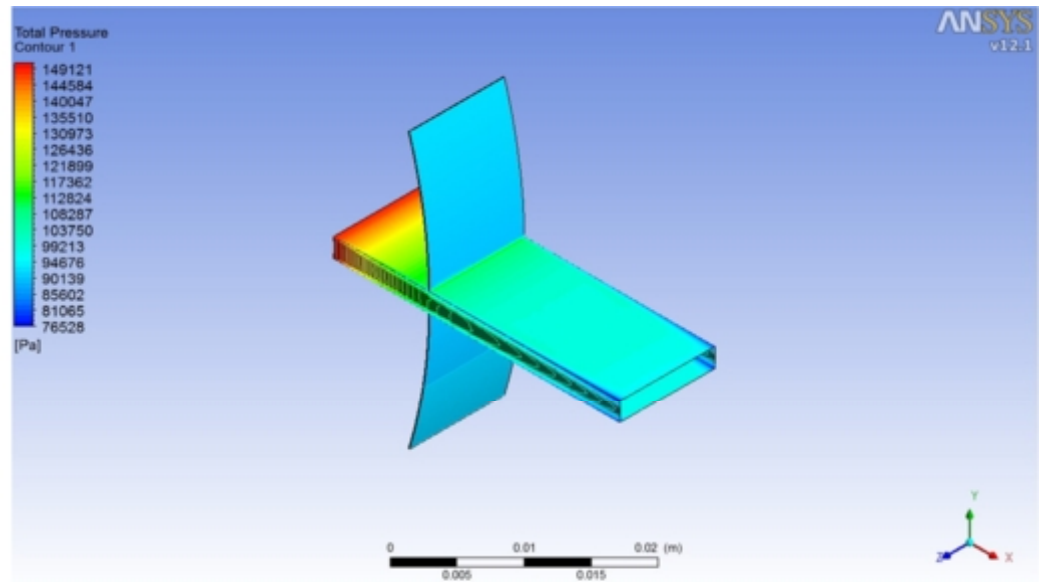
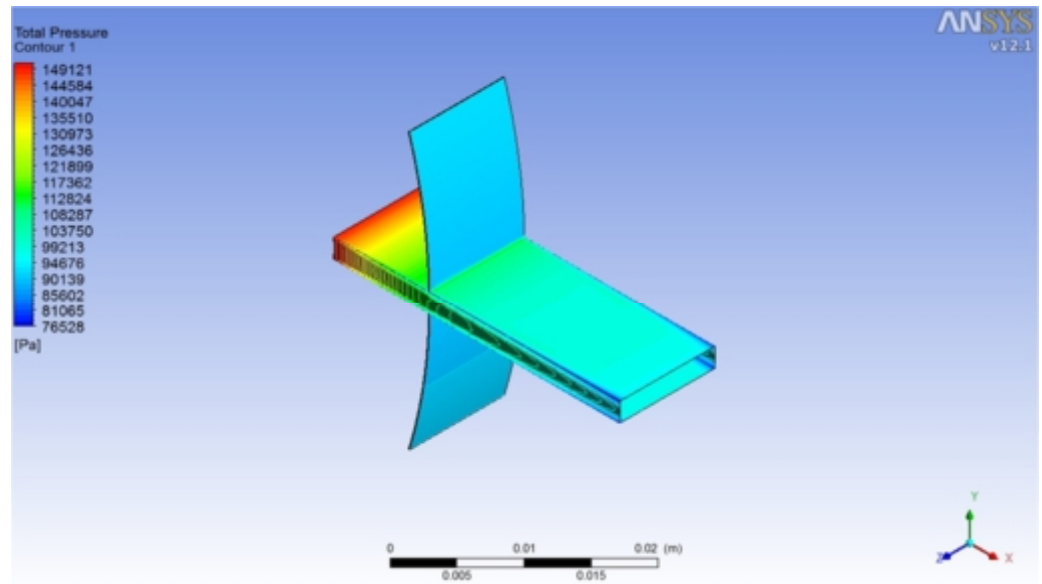


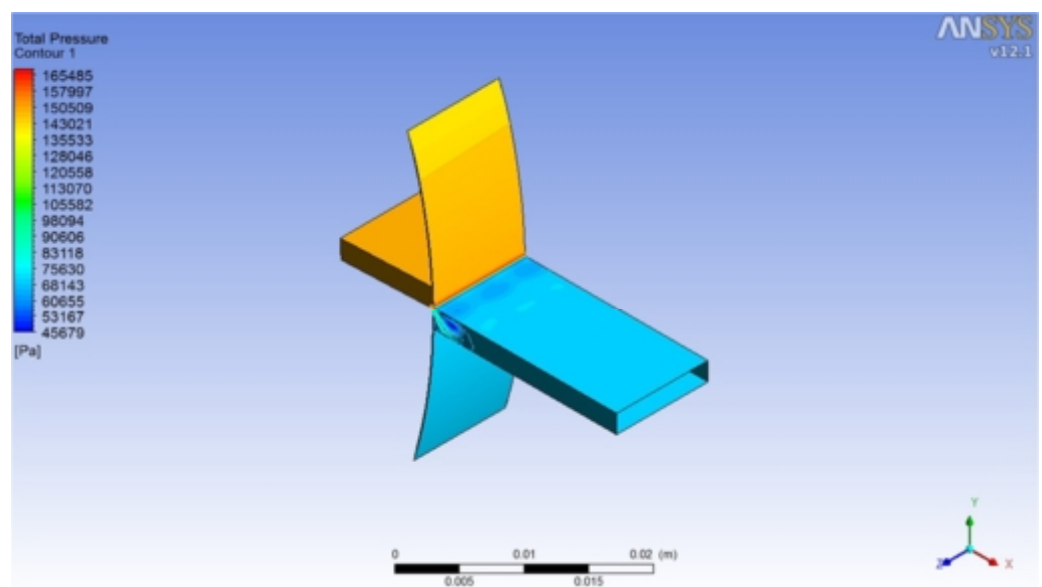
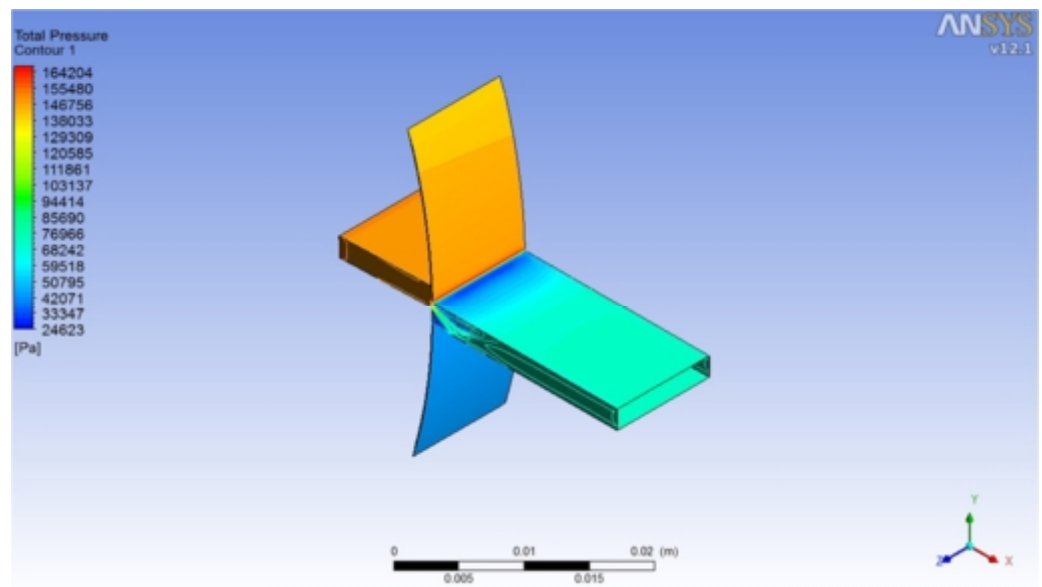
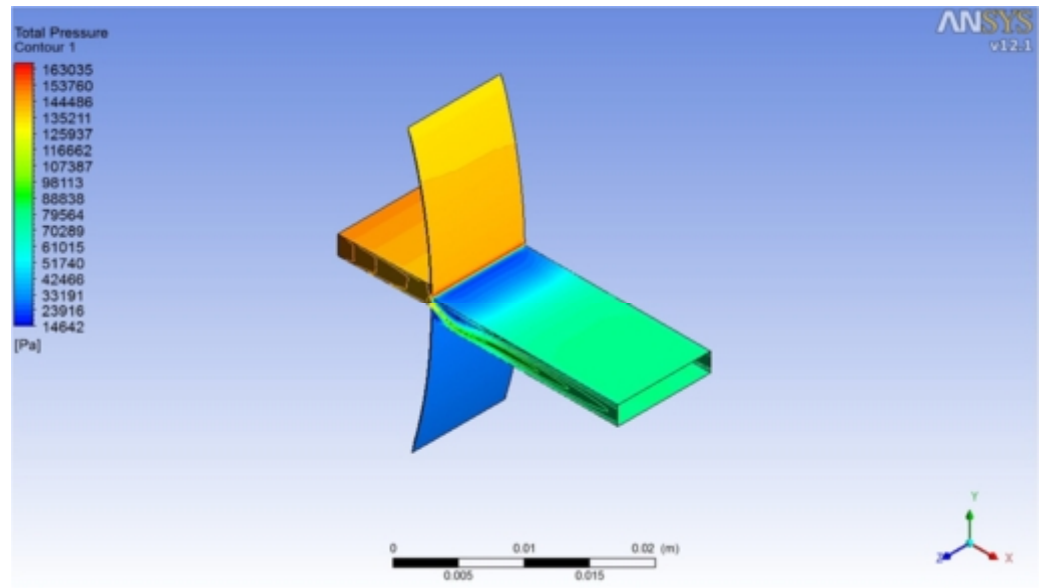


Контурные графики полей давлений (Па) жидкости в каналах РИА при различных положениях ротора относительно статора в техмерных координатах









Протокол расчета зависимостей импульсного давления и скорости от времени.

Т, с (время, соответствующее положению ротора относительно статора)	Р, па, (импульсное давление)	V, м/с Скорость
2,63e-05	145119	2
5,25e-05	151764,3	2,33
7,88e-05	149163,3	3,89
0,000105	166926,5	4,72
0,000131	184523,2	7
0,000158	205339,4	5
0,000184	270436,8	2
0,00021	279611,8	1,9
0,000236	276503,2	2,3
0,000263	6875,31	2
0,000289	98078,24	2,17
0,000315	156292,4	1,75
0,000341	220588,8	2
0,000368	210224,3	2
0,000394	191366,8	2
0,00042	184864,2	2
0,000446	155317	2
0,000473	153881,7	1,9
0,000499	161494,5	2
0,000525	172993	2
0,000551	159694,3	1,8
0,000578	145119	2

Описание алгоритма расчета полей скорости и давления РИА в программном продукте ANSYS

В нашем случае модель внутреннего объема роторного импульсного аппарата была создана в программной среде Autodesk Inventor (рис. 6.1), в масштабе 1:1, основные единицы измерения в миллиметрах и сохранена в формате *.sat.

В данной модели кажущаяся небольшой величина зазора между ротором и статором имеет значения 0,1мм. Поэтому модель полностью соответствует вышеуказанным требованиям.

После создания модели приступаем ко второму этапу расчета.

Запускаем программу Ansys. В открывшемся окне в левом верхнем углу выбираем из списка Analysis Systems шаблон для расчета турбулентных течений жидкости Fluid Flow (CFX) (рис.6.2). В окне Fluid Flow (CFX) нажимаем правой кнопкой мыши на ячейку Geometry, выбираем вкладку Import Geometry, а в ней вкладку Browse. В открывшемся окне выбираем модель, которую хотим добавить в расчёт. Далее выбираем единицы измерения геометрической модели, рис.6.3.

В программном продукте Autodesk Inventor была создана трехмерная модель для расчета РИА с геометрическими параметрами:

$\delta = 1 \cdot 10^{-4}$ м – зазор между ротором и статором;

$a_p = 0,002$ м – ширина канала ротора;

$a_c = 0,002$ м – ширина канала статора;

$h = 0,01$ м – высота каналов ротора и статора;

$R_p = 0,1$ м – радиус ротора;

$l_p = 0,01$ м – длина канала ротора;

$l_c = 0,02$ м – длина канала статора;

$z = 20$ шт. - количество каналов в роторе и статоре.

В появившемся окне нажимаем кнопку Generate, далее происходит загрузка исследуемой модели в среду программы Ansys .

Возвращаемся к основному окну программы рис.6.2. выбираем следующий пункт расчета - Mesh. В открывшемся окне выбираем размер ячейки сетки Рис.6.4. Нажимаем кнопку Generate Mesh, происходит построение сетки в данном объеме. Нажимаем кнопку Update.

Возвращаемся к основному окну программы рис.6.2. выбираем следующий пункт расчета - Setup. Здесь происходит задание граничных условий, материалов и пр.

Вначале, зададим количество итераций вычислений. Открываем ячейку Solver Control в столбце Outline (дабл-клик на Solver Control). Во вкладке Basic settings, в ячейках min. Iterations и max. Iterations вбиваем желаемое мин и макс, соответственно, количество итераций, и нажимает Ок (рис 6.5)

Зададим материал и температурный режим.

Открываем ячейку Default Domain в столбце Outline.

В графе Material (вкладка Basic settings) выбираем Water (вода).

В графе Option, окна Heat Transfer (вкладка Fluid models) выбираем температурный режим (Thermal Energy).

С помощью вкладки Boundary выпадающего меню Insert на панели инструментов добавляем начальные и конечные граничные условия.

Открываем вкладку Boundary выпадающего меню Insert (клик на Solver Control).В появившемся вбиваем название сектора входных параметров (начальных условий), например, in.

В открывшейся панели Boundary: in, во вкладке Basic settings выбираем в начале тип условий, а после локацию, где они находится.

Тип выбирается во вкладке Boundary Type. Для начальных условий входящего потока тип- inlet, начальных условий выходящего потока - outlet.

Локация выбирается во вкладке Location. Для начальных условий- это вход (вход каналов ротора) в модель, начальных условий- выход (выход из каналов статора).

В графе Option панели Mass and Momentum (вкладка Boundary Details) задаём начальное давление, или скорость, или расход (или другие необходимые параметры). В этой же вкладке (Boundary Details) нужно задать начальную температуру (панель Heat Transfer, графа Option), и опции турбулентного режима.

Открываем вкладку Boundary выпадающего меню Insert (клик на Solver Control).

В появившемся вбиваем название сектора выходных параметров , например, out.

В открывшейся панели Boundary: out, во вкладке Basic settings выбираем в начале тип условий, а после локацию, где они находится (рис 6.9).

В графе Option панели Mass and Momentum (вкладка Boundary Details) задаём давление на выходе из модели. 0 Па- течение без сопротивления и разряжения. >0 Па- заданное давление сопротивления течению. «-» Па- разряжение давления на выходе .

Теперь открываем ячейку Solution в основном окне рис.6.2. Появляется окно Define Run, в котором при нажатии на кнопку Start Ran (рис 6.10) запускается расчёт модели и открывается окно визуального отображения расчётов CFX-Solver Manager (рис 6.11).

После завершения всех итераций закрываем окно расчетов и переходим к обработки результатов.

Открываем вкладку Contour (контурное отображение данных) выпадающего меню Insert (клик на Contour). В открывшемся окошке вводим желаемое имя (пример, Contour 1). После ввода имени появляется подменю Details of Contour 1 (рис 6.12).

Во вкладке Geometry подменю Details of Contour 1 можно выполнять следующие действия:

В графе Locations производим выбор локации, на которой будут отображаться данные.

В графе variable выбираем тип отображаемых данных (давление).

В графе # of Contours выбираем количество отображаемых контуров данных (50).

Редактирование легенды данных осуществляется во вкладке Default Legend View 1 в меню Outline.

Открываем вкладку Default Legend View 1 (клик на Default Legend View 1).

В открывшемся подменю Details of Default Legend View 1 во вкладке Definition можно изменить расположение легенды на экране и её название, а во вкладке Appearance вид данных (в графе Precision выбрать вид или Fixed или Scientific), а так же количество знаков после запятой (в графе Precision).

Модель и отображаемые на ней поля давлений можно вращать и перемещать в пространстве, приближать и удалять рис 6.13, 6.14.

Открываем ячейку Results в Project Schematic Workbench'a (клик на Results).

Исследование численных значений скоростей и давлений в данной модели, осуществляется по следующей схеме:

1. Выбирается область пространства модели, в которой необходимо провести измерение, то есть визуально приближается либо удаляется при помощи кнопок управления (см. рис 6.15).
2. Выбирается точечное значение на выбранной области.
3. Выбирается отображаемая величина (давление, скорость).

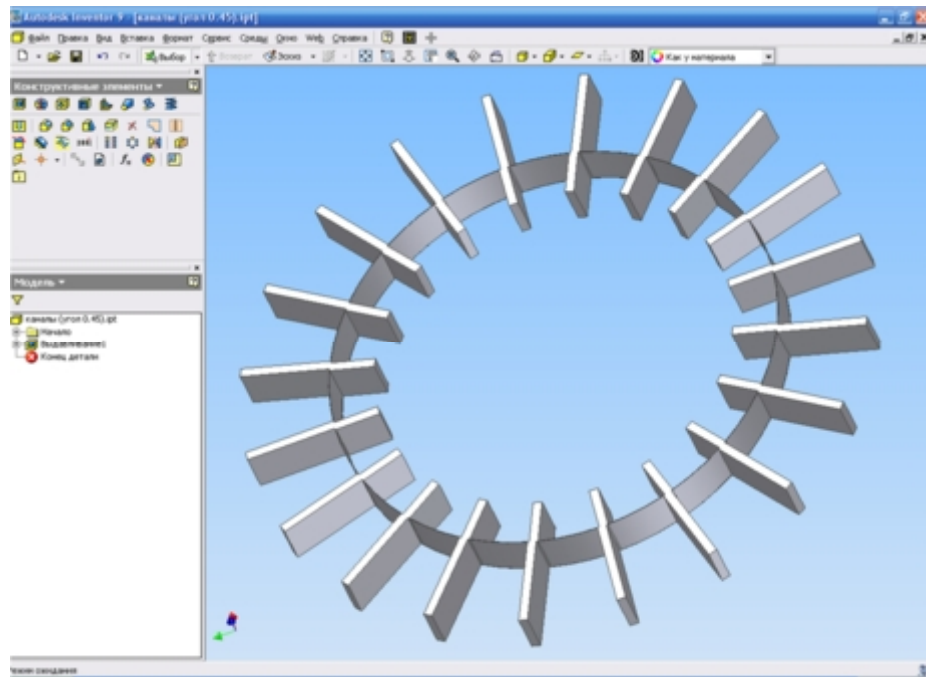


Рис 6.1. Трехмерная модель внутреннего объема для расчета.

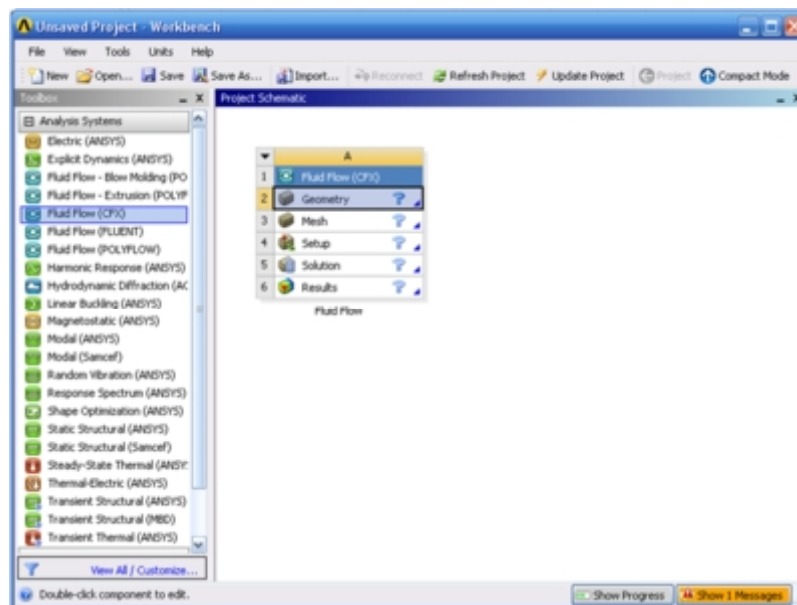


Рис. 6.2. Основное окно программы Ansys.

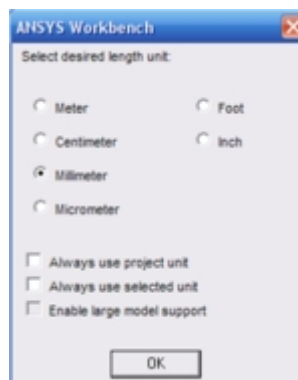


Рис 6.3. Выбор единиц измерения геометрической модели.

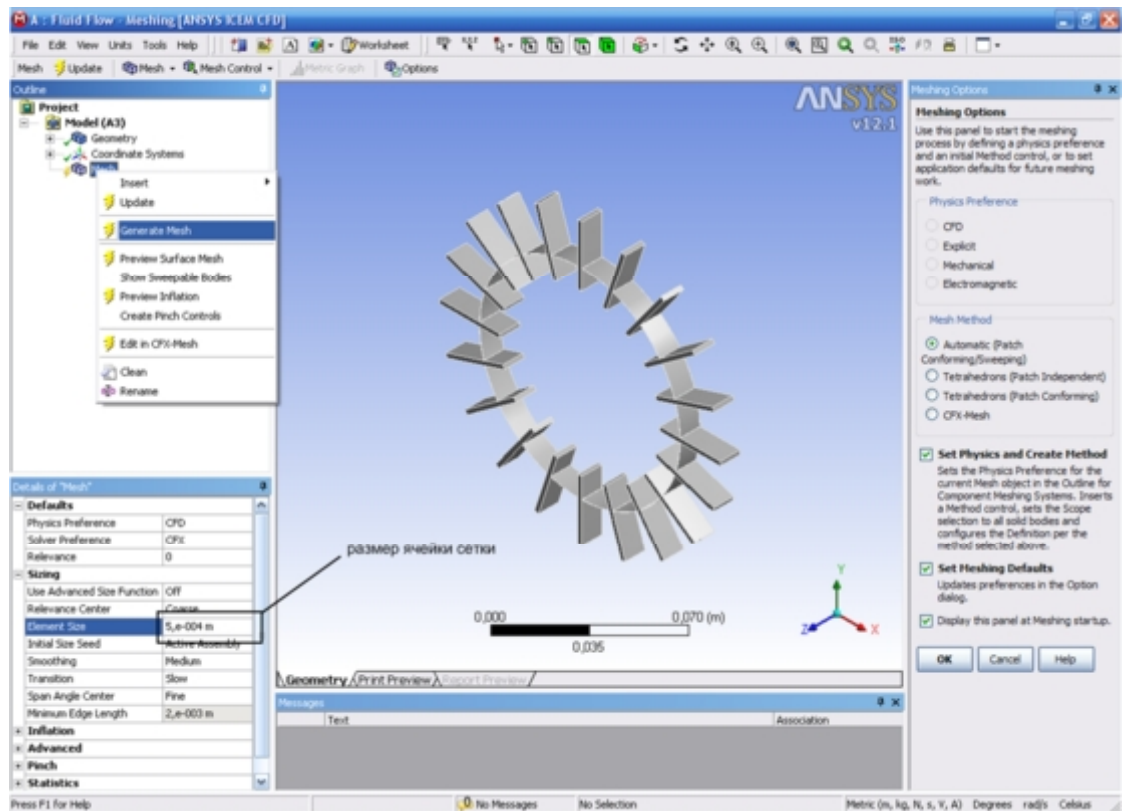


Рис 6.4 Построение расчетной сетки

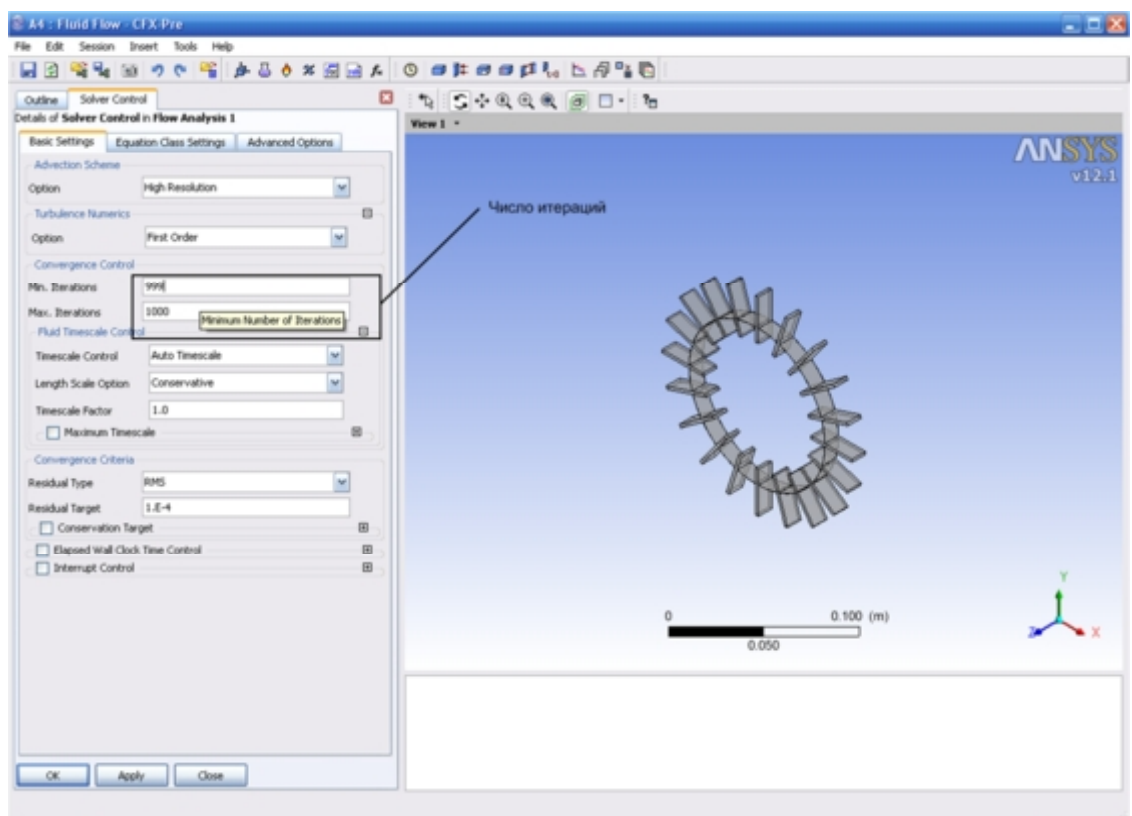


Рис 6.5 Задание числа итераций

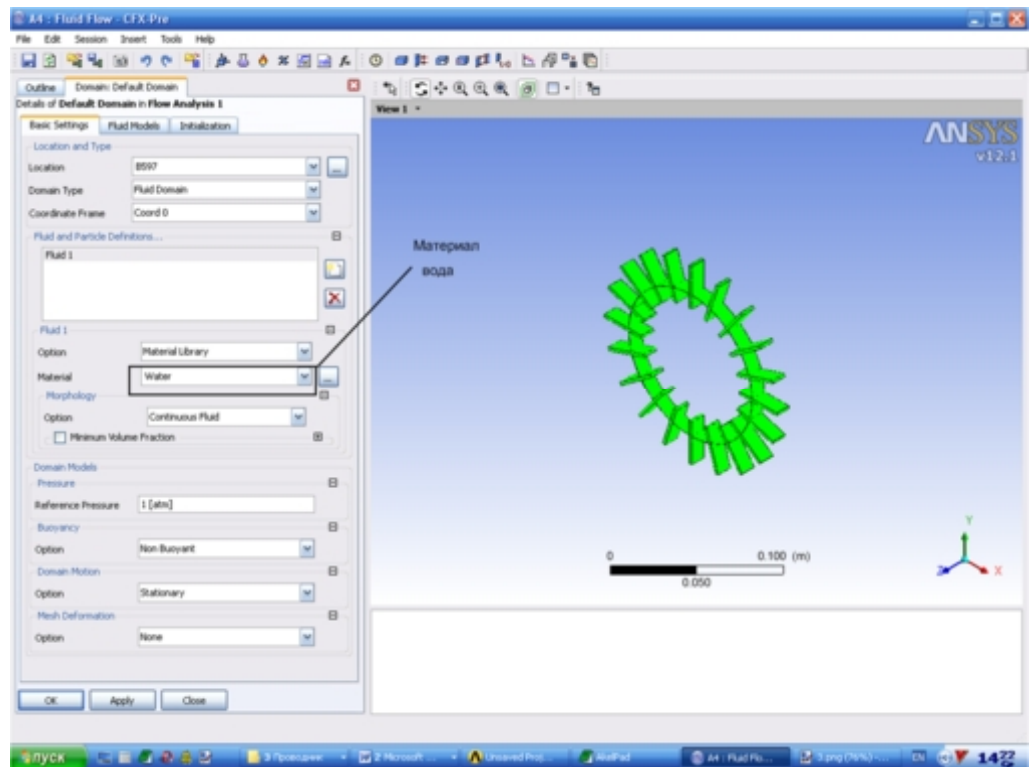


Рис.6.6 Выбор материала (в данном случае обрабатываемая среда)

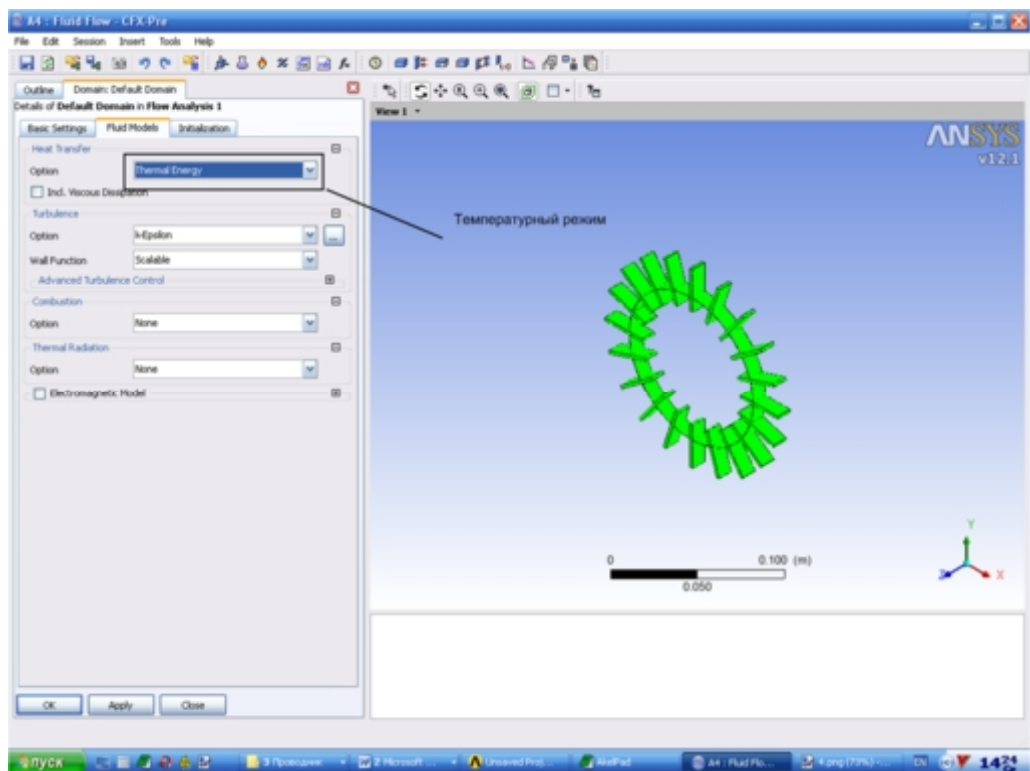


Рис.6.7 Выбор температурного режима

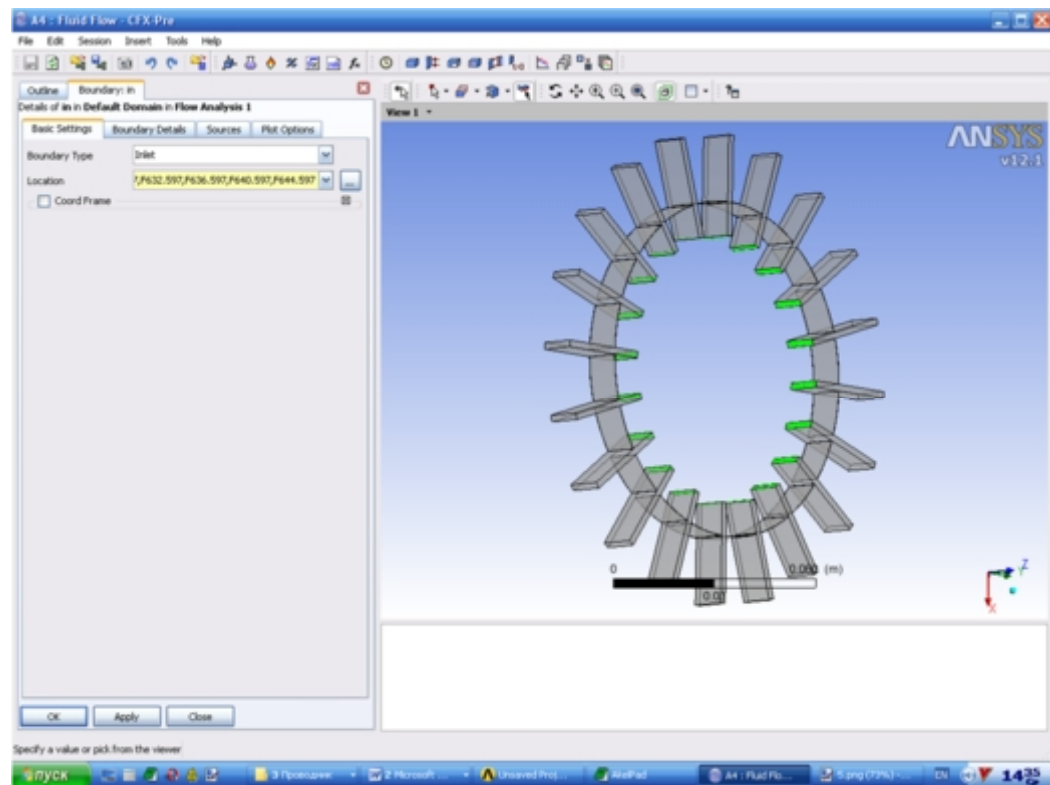


Рис 6.8 Ввод граничных условий. Указаны грани входа жидкости в каналы ротора.

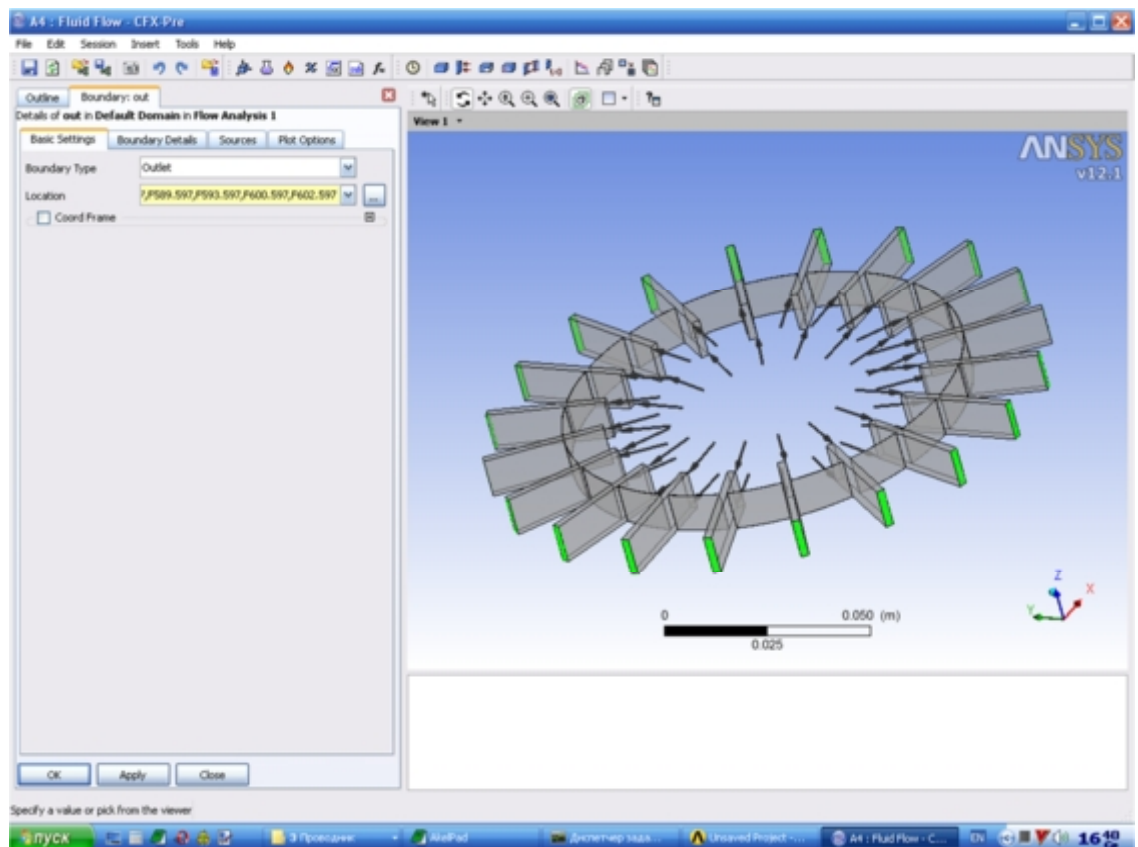


Рис 6.9 Ввод граничных условий. Указаны грани выхода жидкости из каналов статора.

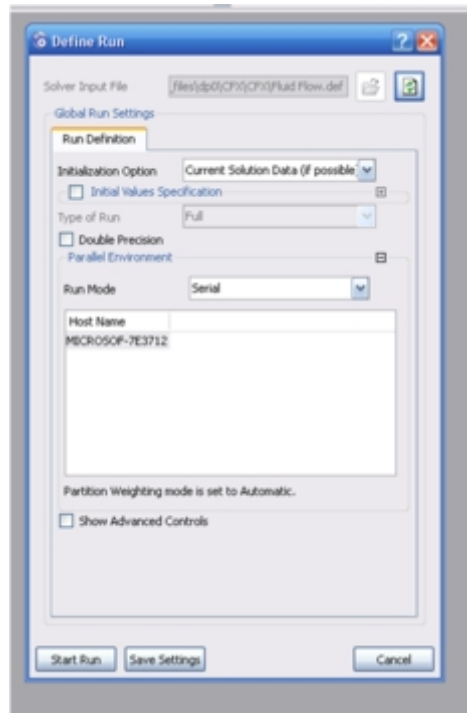


Рис.6.10 Окно запуска расчета.

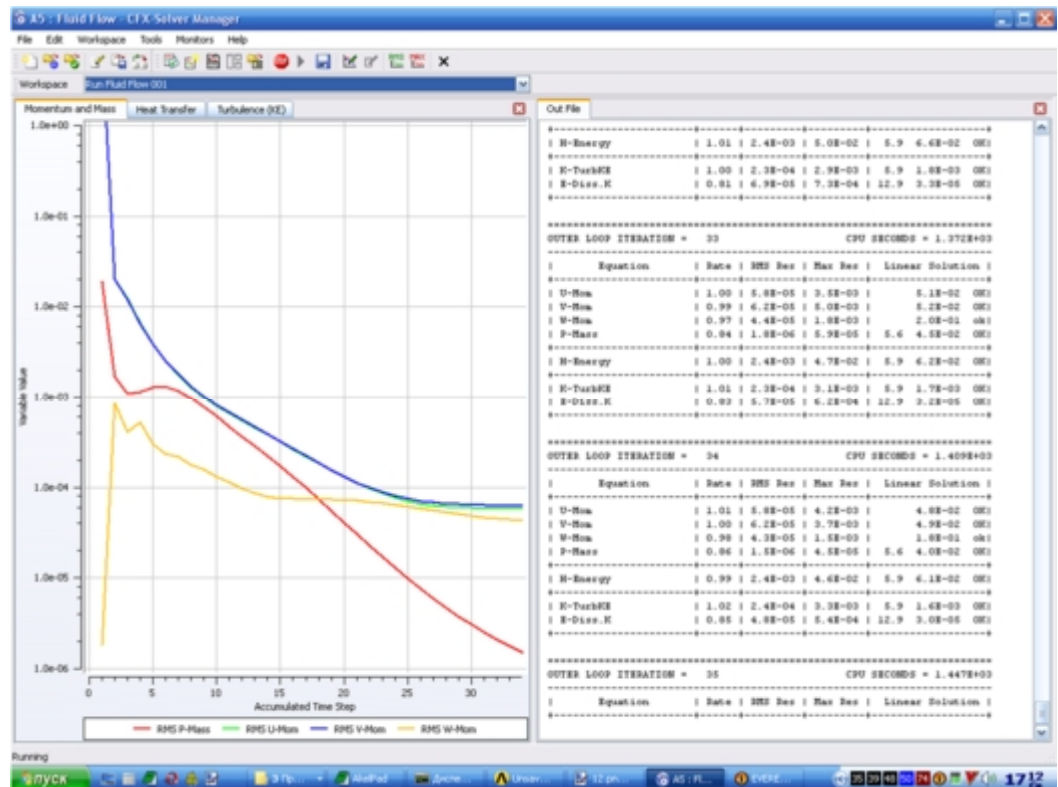


Рис 6.11 Окно отображения процесса расчета.

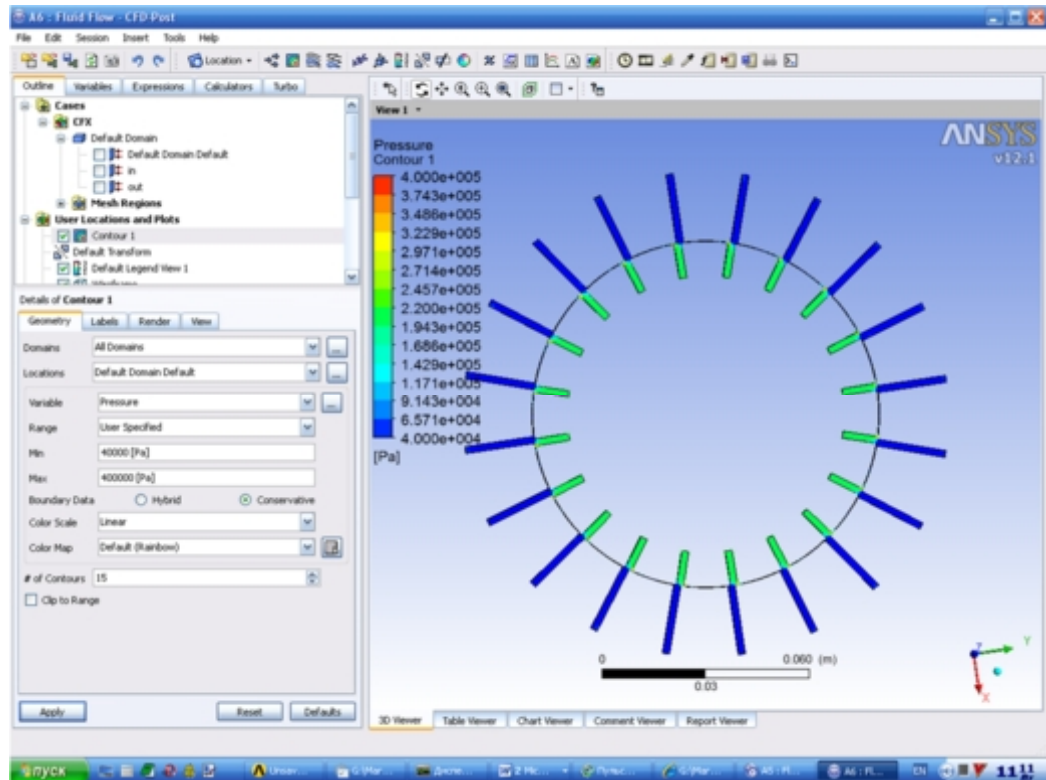


Рис. 6.12 Отображение полей давлений

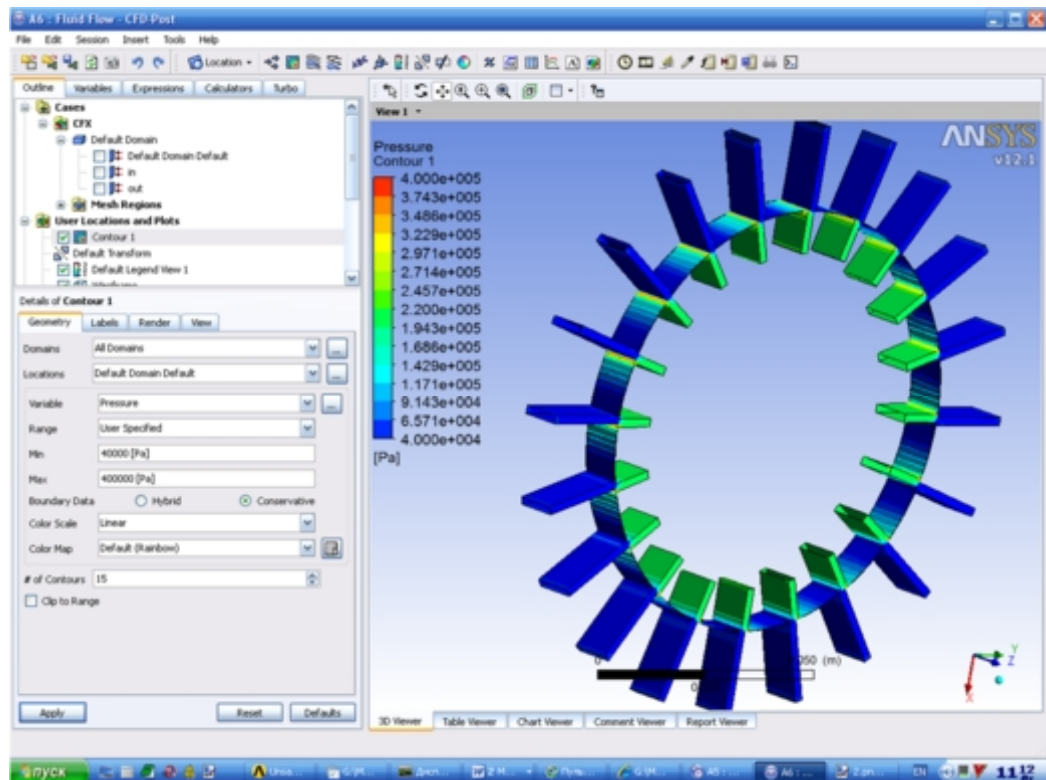


Рис. 6.13. Построение полей давлений в объеме.

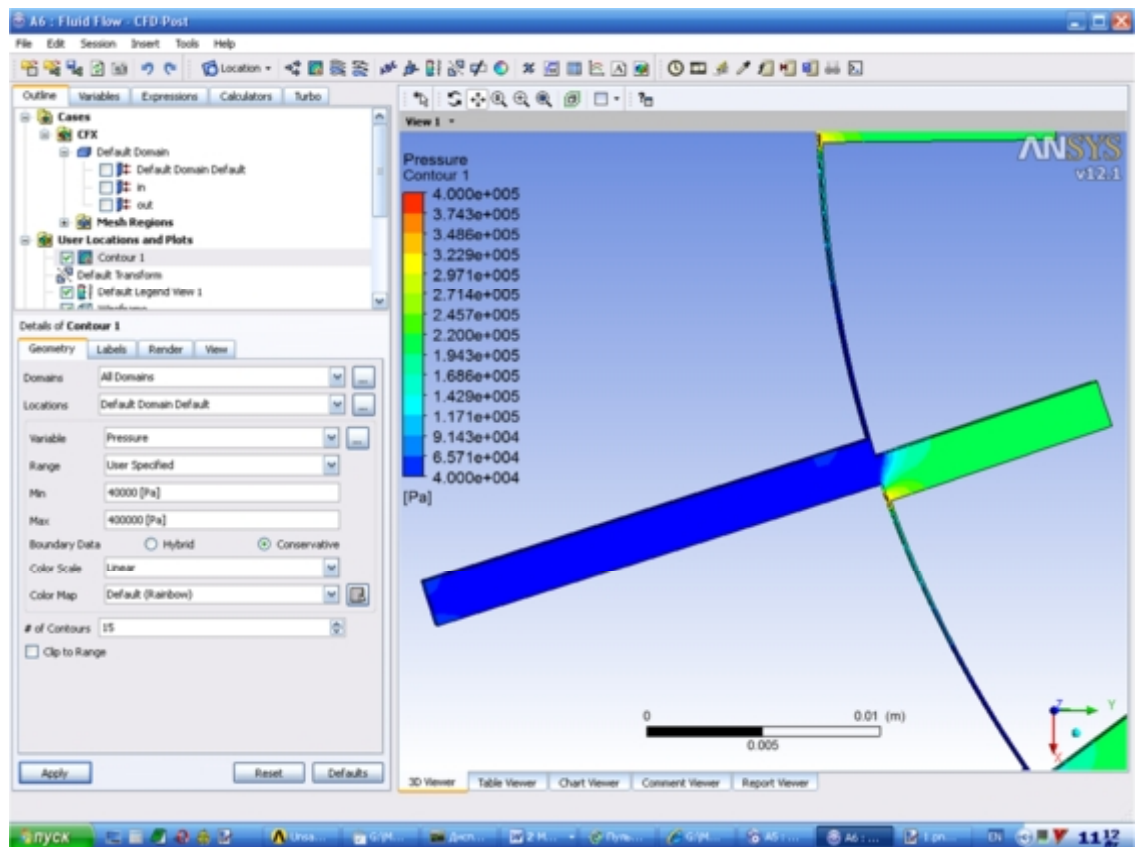


Рис. 6.14. Увеличение участка модели.

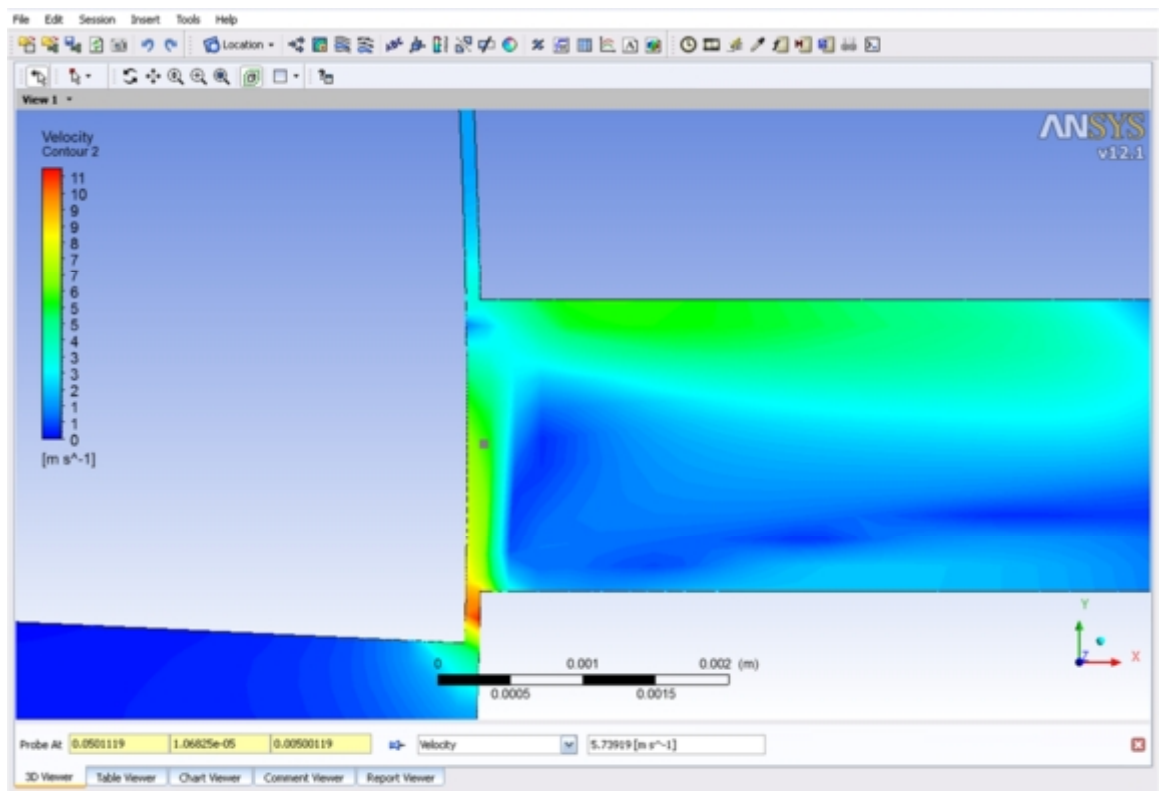


Рис 6.15 Измерение численного значения параметров в точке

**Результаты вычислительных экспериментов по определению
влияния геометрических и режимных параметров РИА
на величины скорости, ускорения, расхода и
давления потока жидкости в канале статора**



Рис. 7.1. Графики зависимостей скорости потока жидкости в канале статора от времени, при различных величинах зазора между ротором и статором.
1- $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м; 2- $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$ м; 3- $\delta = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м; 4- $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ м; 5- $\delta = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м.

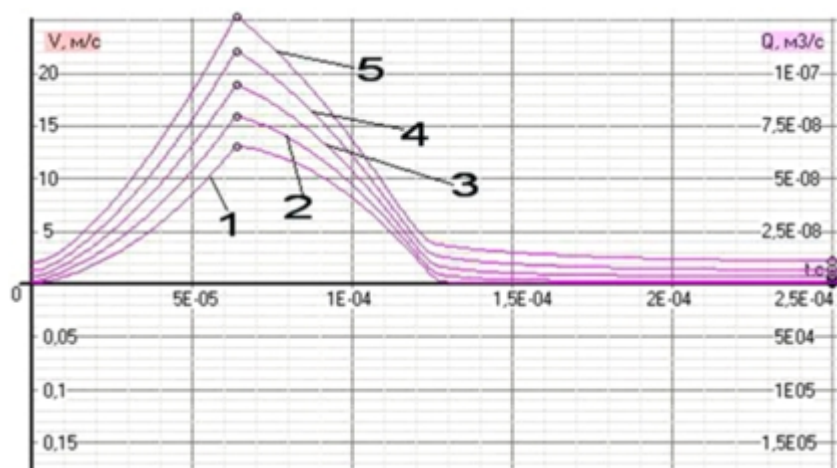


Рис. 7.2. Графики зависимостей расхода через один канал от времени, при различных величинах зазора между ротором и статором.
1- $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м; 2- $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$ м; 3- $\delta = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м; 4- $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ м; 5- $\delta = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м.

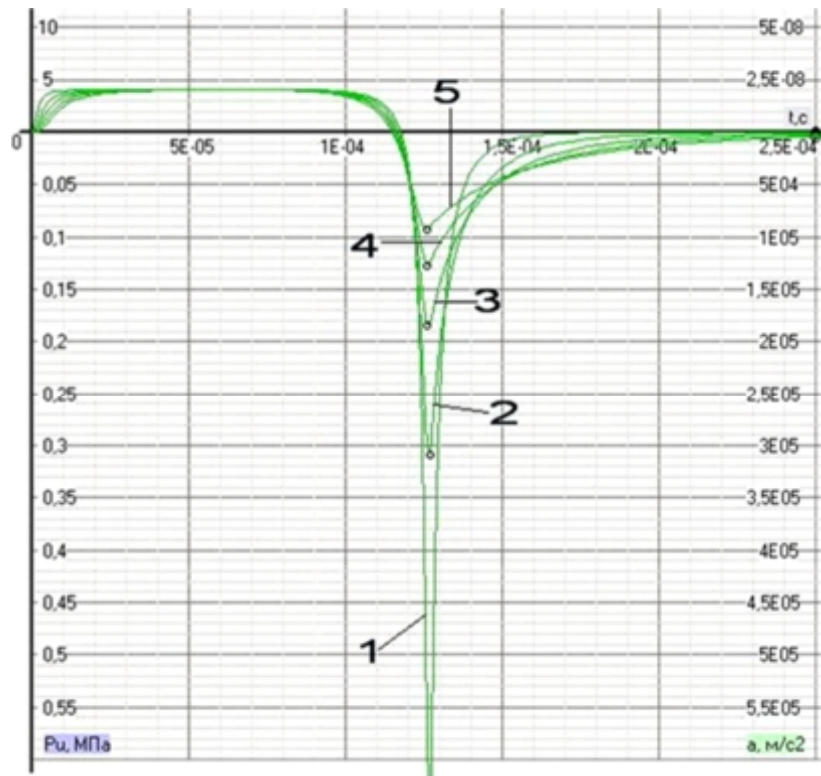


Рис. 7.3. Графики зависимостей ускорения от времени, при различных величинах зазора между ротором и статором.

1- $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м; 2- $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$ м; 3- $\delta = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м; 4- $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ м; 5- $\delta = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м.

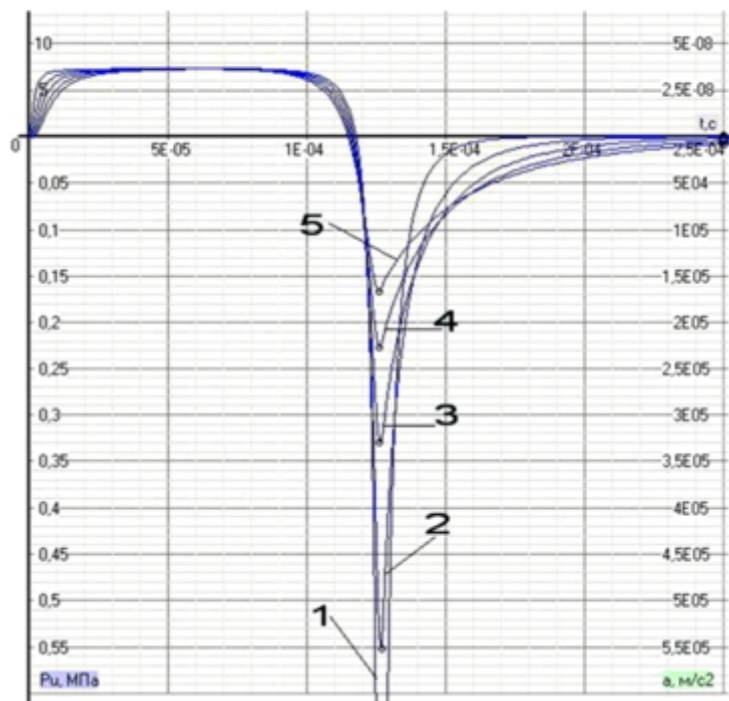


Рис. 7.4. Графики зависимостей давления от времени, при различных величинах зазора между ротором и статором:

1- $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м; 2- $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$ м; 3- $\delta = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м; 4- $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ м; 5- $\delta = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м.

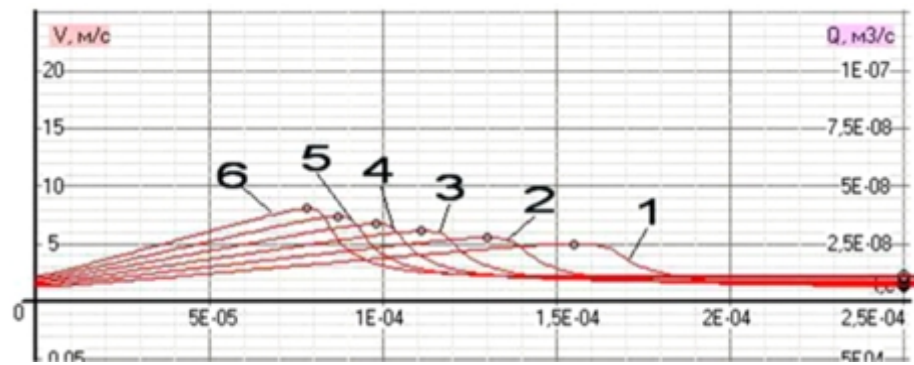


Рис. 7.5. Графики зависимостей скорости от времени.

1- $R_p = 0,075$ м; 2- $R_p = 0,09$ м; 3- $R_p = 0,105$ м;
4- $R_p = 0,12$ м; 5- $R_p = 0,135$ м; 6- $R_p = 0,15$ м.



Рис. 7.6. Графики зависимостей расхода от времени.

1- $R_p = 0,075$ м; 2- $R_p = 0,09$ м; 3- $R_p = 0,105$ м;
4- $R_p = 0,12$ м; 5- $R_p = 0,135$ м; 6- $R_p = 0,15$ м.

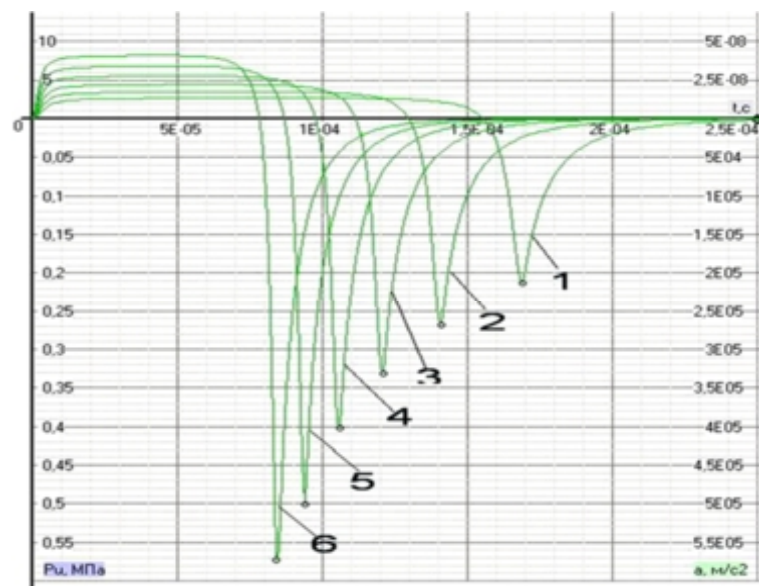


Рис. 7.7. Графики зависимостей ускорения от времени.

1- $R_p = 0,075$ м; 2- $R_p = 0,09$ м; 3- $R_p = 0,105$ м;
 4- $R_p = 0,12$ м; 5- $R_p = 0,135$ м; 6- $R_p = 0,15$ м.

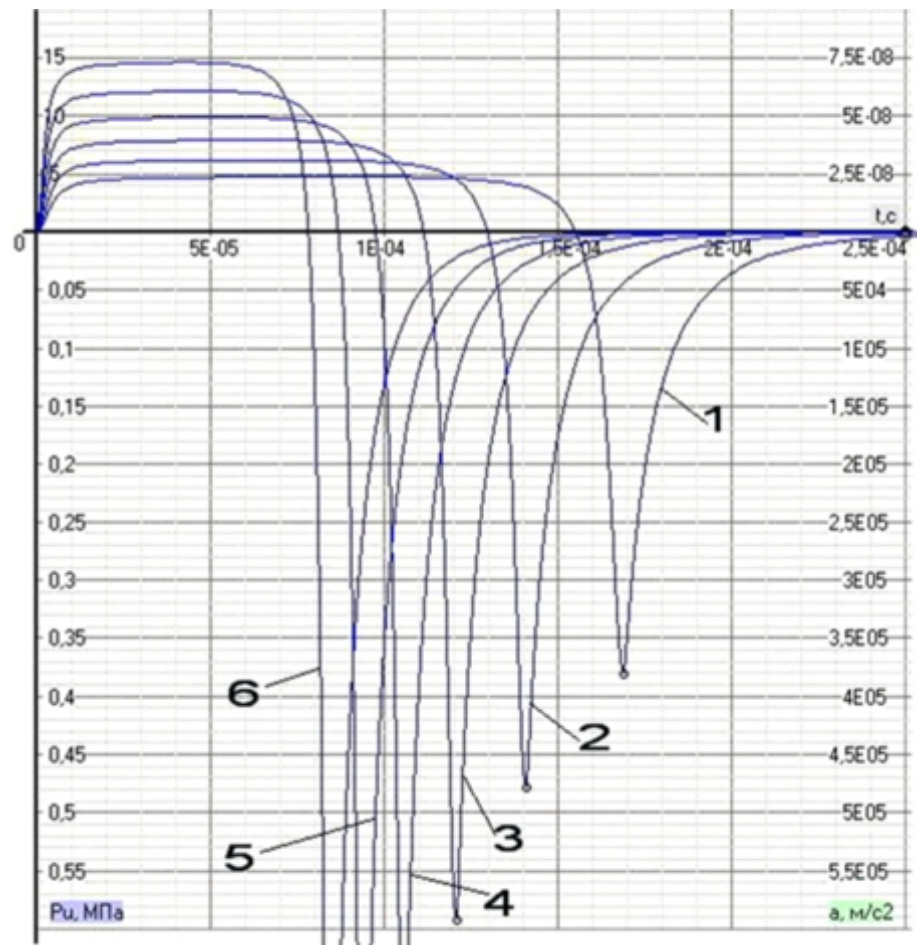


Рис. 7.8. Графики зависимостей давления от времени.

1- $R_p = 0,075$ м; 2- $R_p = 0,09$ м; 3- $R_p = 0,105$ м;
 4- $R_p = 0,12$ м; 5- $R_p = 0,135$ м; 6- $R_p = 0,15$ м.

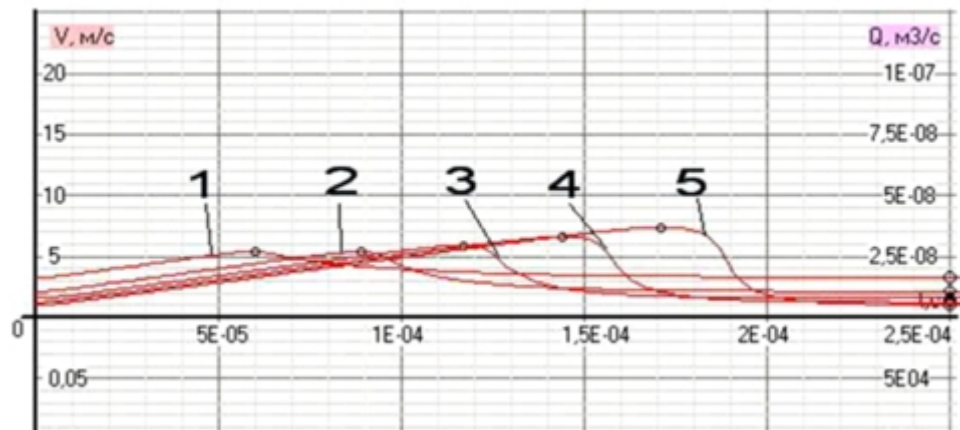


Рис. 7.9. Графики зависимостей скорости от времени, при изменении ширины каналов.

1- $a = 0,001$ м; 2- $a = 0,0015$ м; 3- $a = 0,002$ м; 4- $a = 0,0025$ м; 5- $a = 0,003$ м.



Рис. 7.10. Графики зависимостей расхода от времени, при изменении ширины каналов.

1- $a = 0,001$ м; 2- $a = 0,0015$ м; 3- $a = 0,002$ м; 4- $a = 0,0025$ м; 5- $a = 0,003$ м.

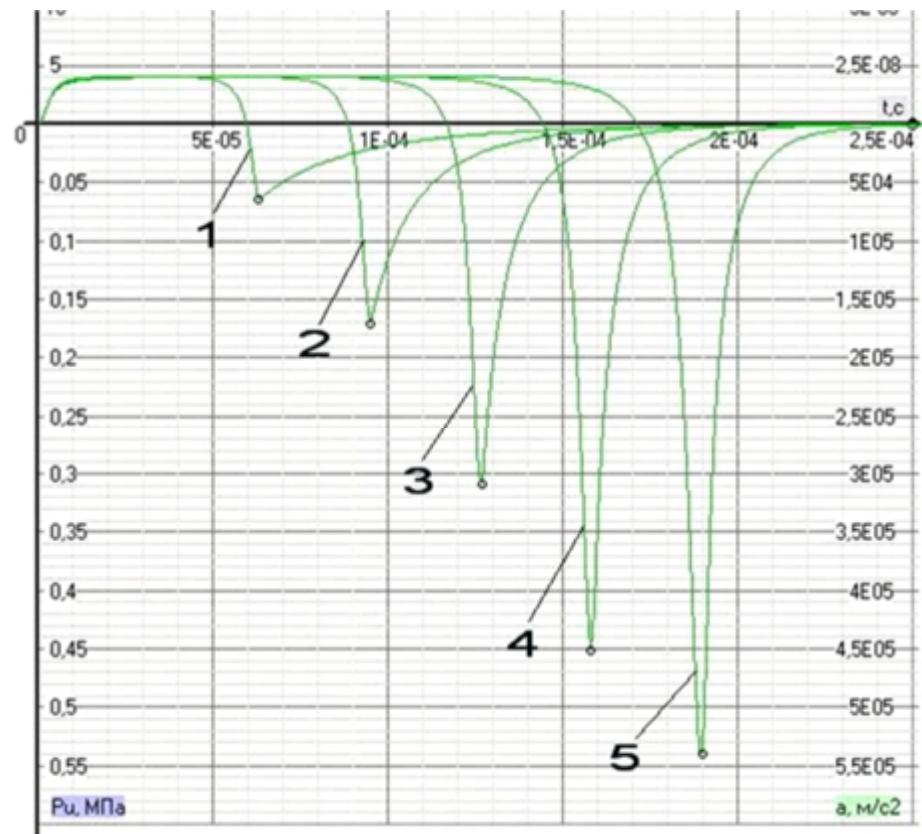


Рис. 7.11. Графики зависимостей ускорения от времени, при изменении ширины каналов.

1- $a = 0,001$ м; 2- $a = 0,0015$ м; 3- $a = 0,002$ м; 4- $a = 0,0025$ м; 5- $a = 0,003$ м.

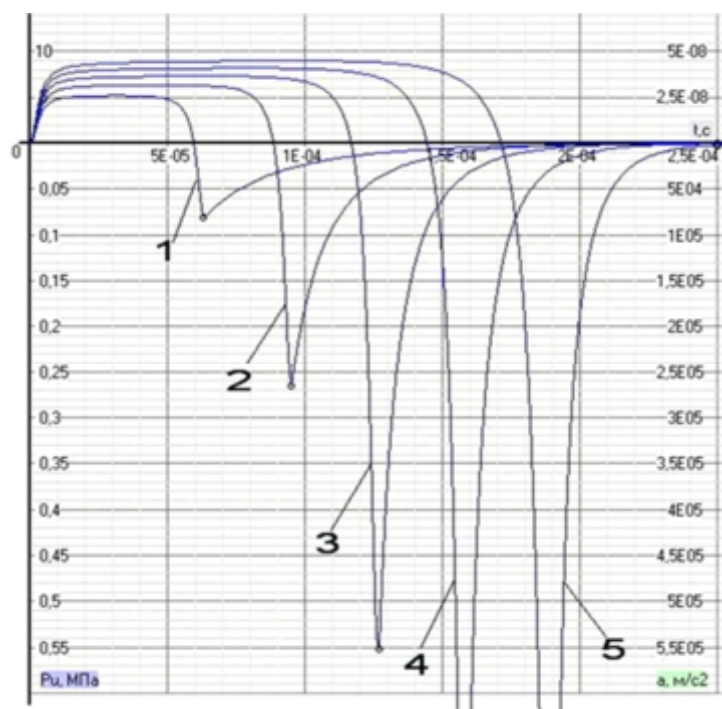


Рис. 7.12. Графики зависимостей давления от времени, при изменении ширины каналов.

1- $a = 0,001$ м; 2- $a = 0,0015$ м; 3- $a = 0,002$ м; 4- $a = 0,0025$ м; 5- $a = 0,003$ м.

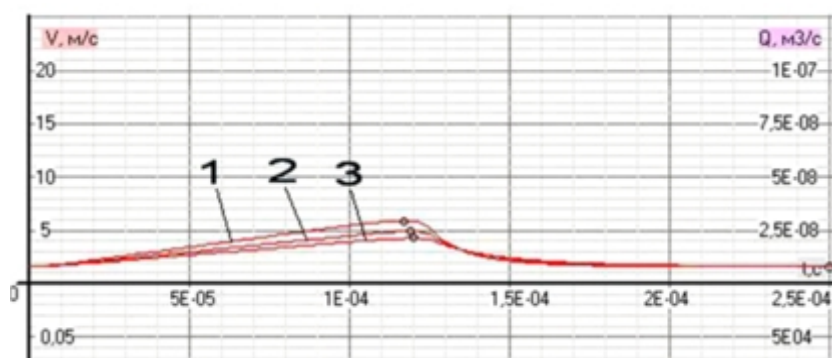


Рис. 2.48. Графики зависимостей скорости от времени.

1- $l_p = 0,01$ м; 2- $l_p = 0,02$ м; 3- $l_p = 0,03$ м.

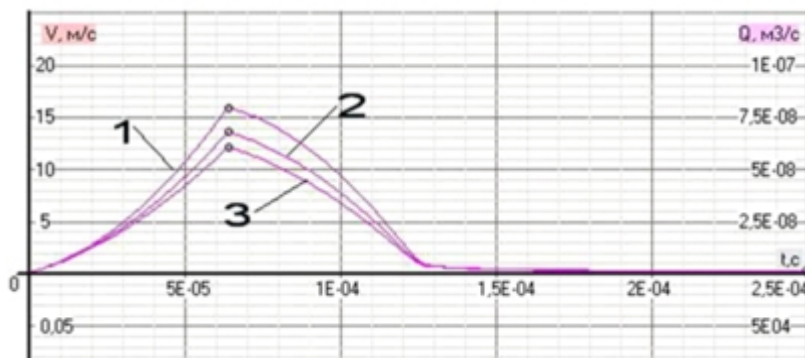


Рис. 2.49. Графики зависимостей расхода от времени.

1- $l_p = 0,01$ м; 2- $l_p = 0,02$ м; 3- $l_p = 0,03$ м.

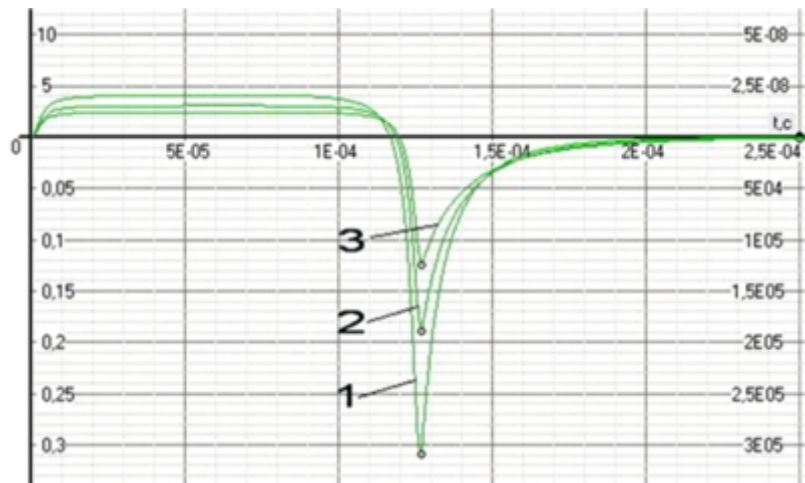


Рис. 7.13. Графики зависимостей ускорений от времени.

1- $l_p = 0,01$ м; 2- $l_p = 0,02$ м; 3- $l_p = 0,03$ м.

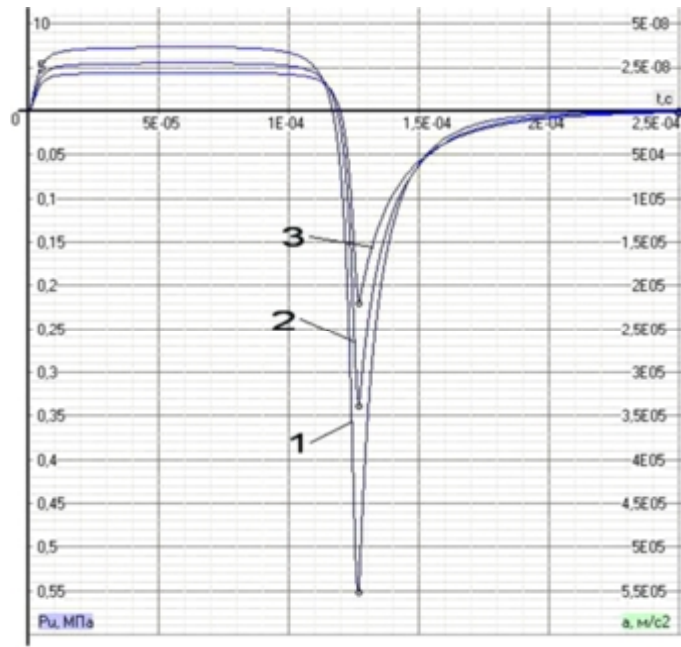


Рис. 7.14. Графики зависимостей импульсного давления от времени.

1- $l_p = 0,01$ м; 2- $l_p = 0,02$ м; 3- $l_p = 0,03$ м.

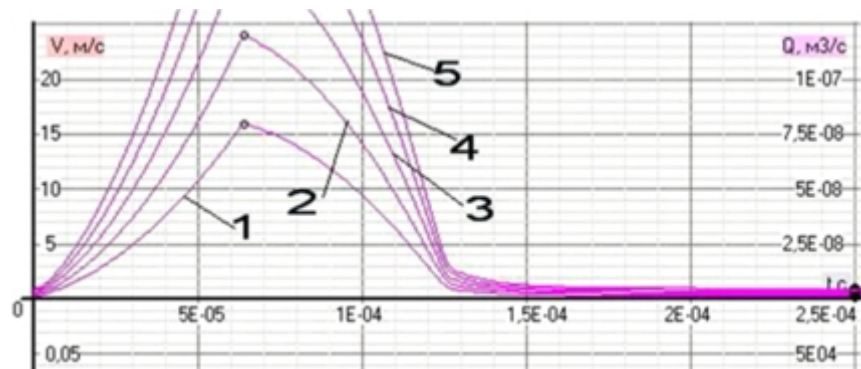


Рис. 7.15. Графики зависимостей расхода.

1- $h = 0,01$ м; 2- $h = 0,015$ м; 3- $h = 0,02$ м; 4- $h = 0,025$ м; 5- $h = 0,03$ м.

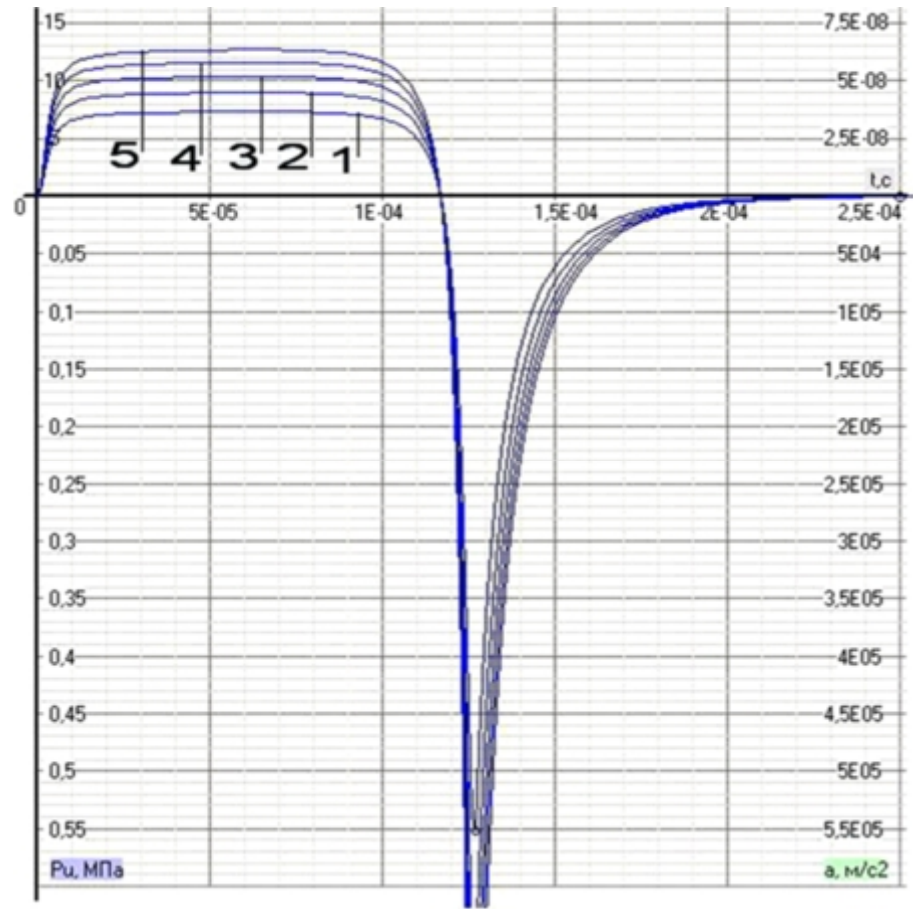


Рис. 1.16. Графики зависимостей импульсного давления, при изменении
высоты каналов.

1- $h = 0,01$ м; 2- $h = 0,015$ м; 3- $h = 0,02$ м; 4- $h = 0,025$ м; 5- $h = 0,03$ м.

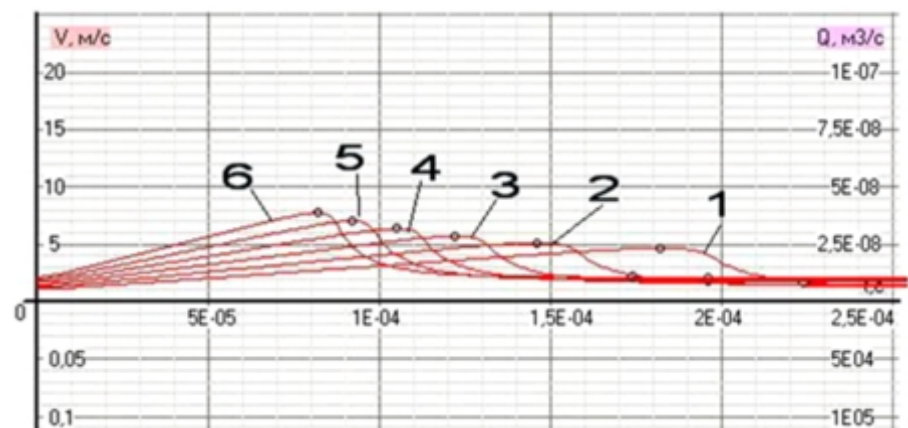


Рис. 7.17. Графики зависимости скорости.

1- $\omega = 200$ с-1; 2- $\omega = 250$ с-1; 3- $\omega = 300$ с-1; 4- $\omega = 350$ с-1; 5- $\omega = 400$ с-1; 6-
 $\omega = 450$ с-1.

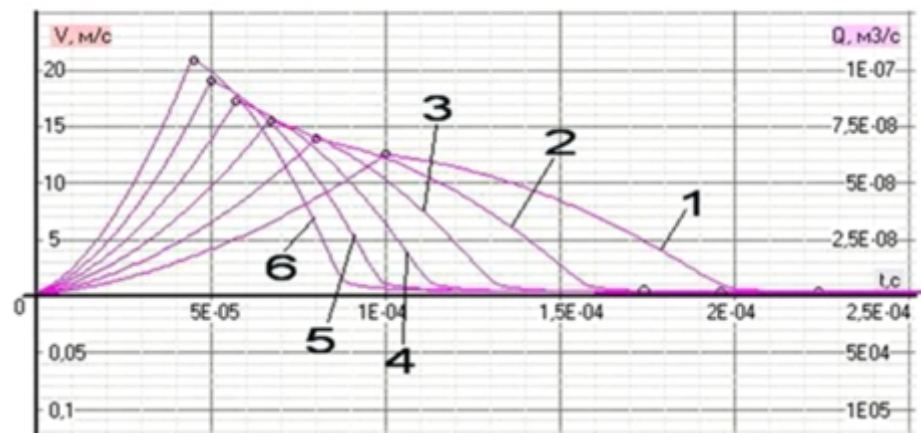


Рис. 7.18. Графики зависимости расхода через один канал.

1- $\omega = 200 \text{ с}^{-1}$; 2- $\omega = 250 \text{ с}^{-1}$; 3- $\omega = 300 \text{ с}^{-1}$; 4- $\omega = 350 \text{ с}^{-1}$; 5- $\omega = 400 \text{ с}^{-1}$; 6- $\omega = 450 \text{ с}^{-1}$.

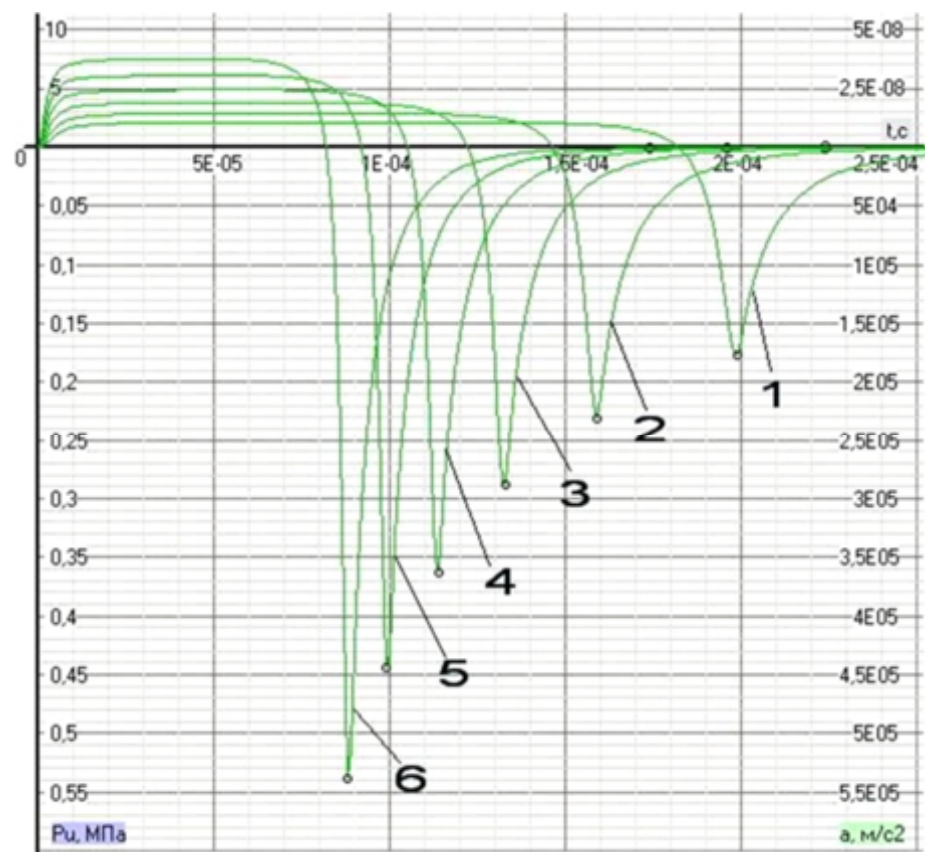


Рис. 7.19. Графики зависимостей ускорения.

1- $\omega = 200 \text{ с}^{-1}$; 2- $\omega = 250 \text{ с}^{-1}$; 3- $\omega = 300 \text{ с}^{-1}$; 4- $\omega = 350 \text{ с}^{-1}$; 5- $\omega = 400 \text{ с}^{-1}$; 6- $\omega = 450 \text{ с}^{-1}$.

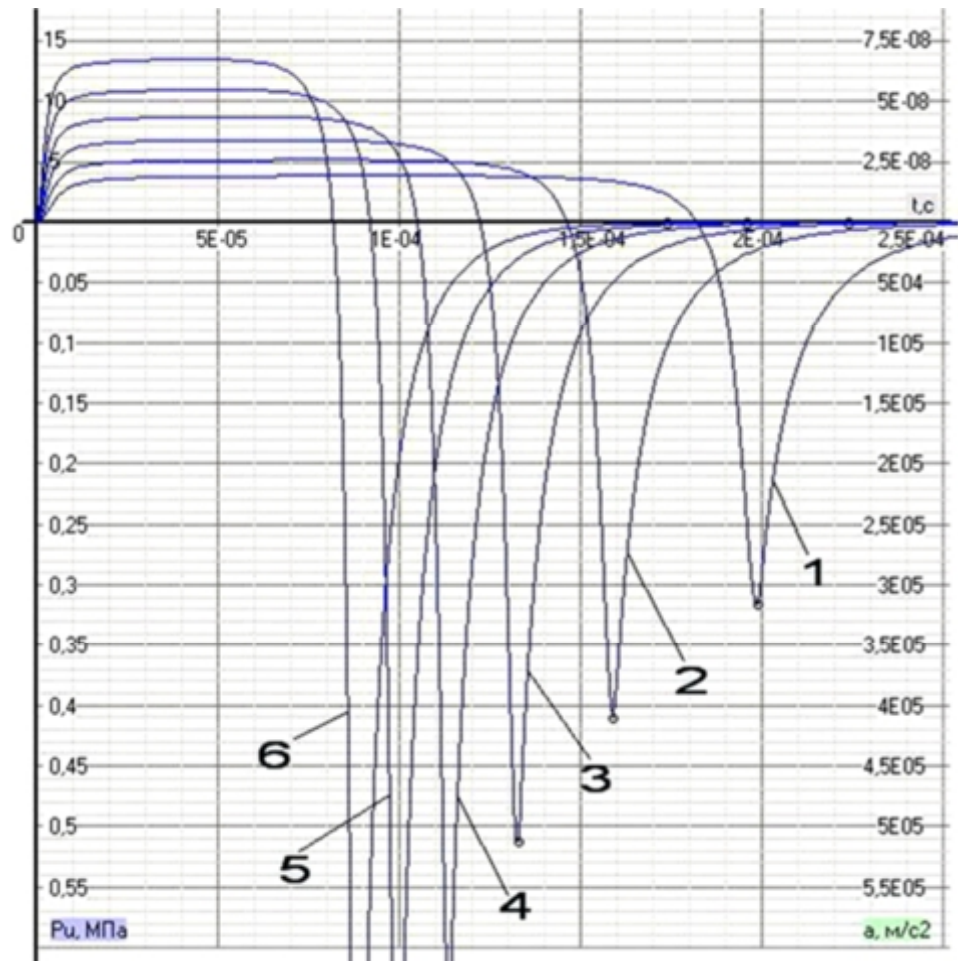


Рис. 7.20. Графики зависимостей давления.

1- $\omega = 200 \text{ с}^{-1}$; 2- $\omega = 250 \text{ с}^{-1}$; 3- $\omega = 300 \text{ с}^{-1}$; 4- $\omega = 350 \text{ с}^{-1}$; 5- $\omega = 400 \text{ с}^{-1}$; 6- $\omega = 450 \text{ с}^{-1}$.

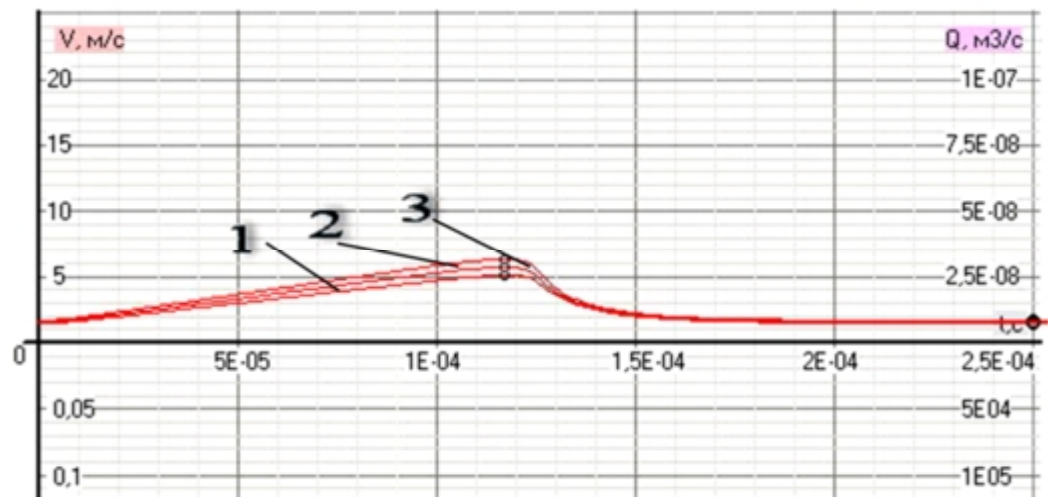


Рис. 7.21. Графики зависимостей скорости.

1- $P_{\text{ст}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 2- $P_{\text{ст}} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 3- $P_{\text{ст}} = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

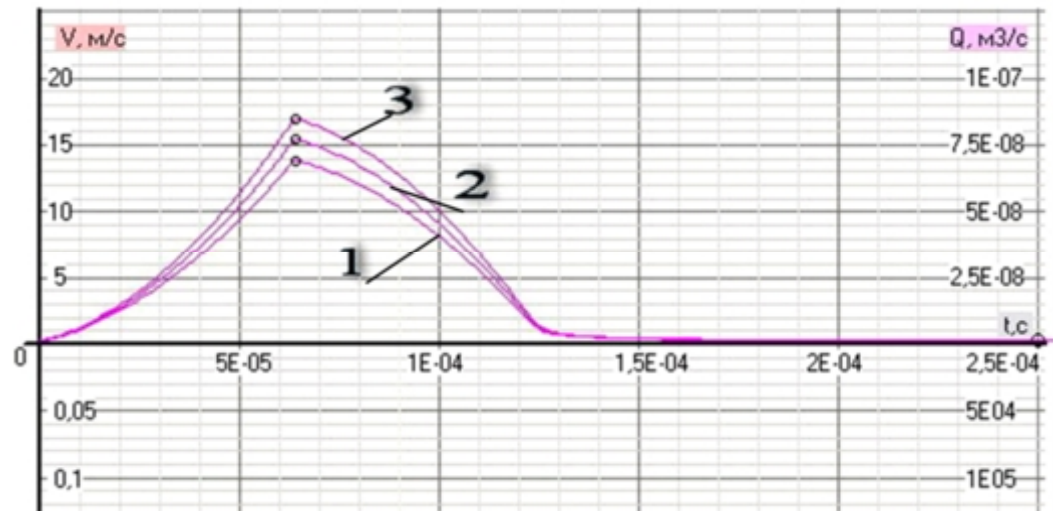


Рис. 7.22. Графики зависимостей расхода.

1- $P_{ст} = 1 \cdot 10^5$ Па; 2- $P_{ст} = 2,5 \cdot 10^5$ Па; 3- $P_{ст} = 4 \cdot 10^5$ Па.

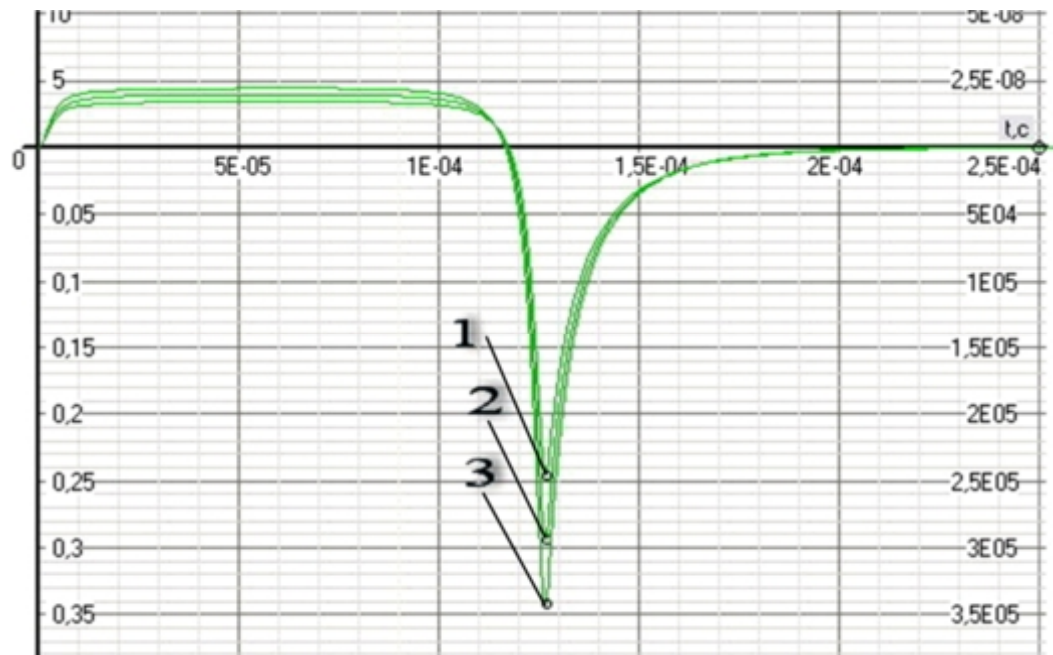


Рис. 7.23. Графики зависимостей ускорения.

1- $P_{ст} = 1 \cdot 10^5$ Па; 2- $P_{ст} = 2,5 \cdot 10^5$ Па; 3- $P_{ст} = 4 \cdot 10^5$ Па.

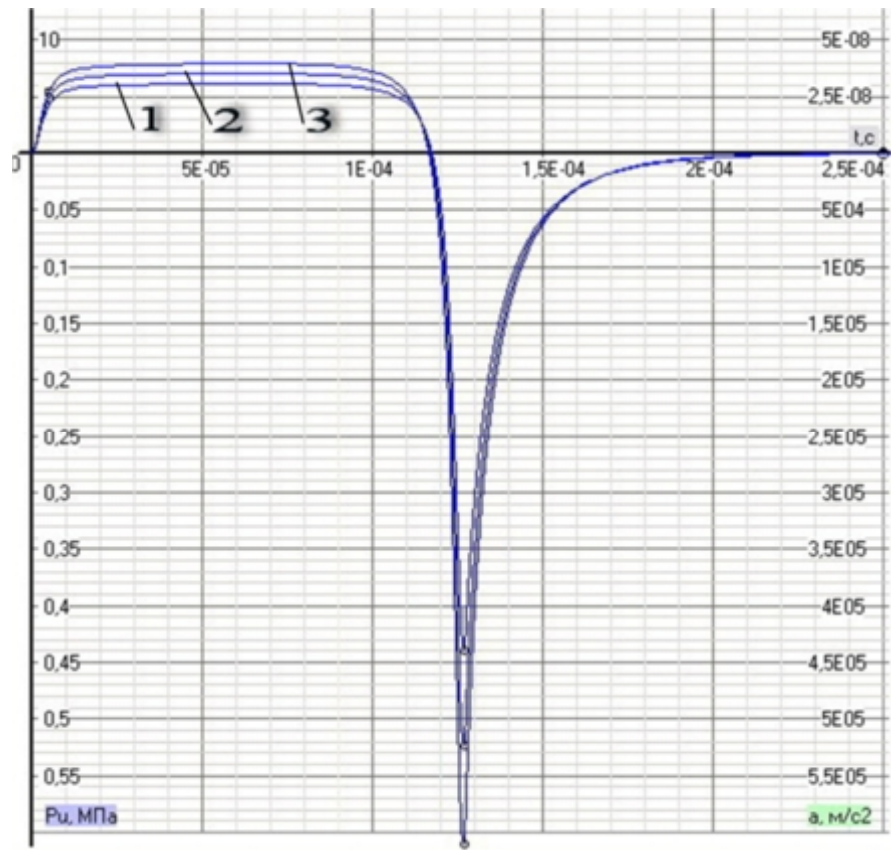


Рис. 7.24. Графики зависимостей импульсного давления.

1- $P_{ст} = 1 \cdot 10^5$ Па; 2- $P_{ст} = 2,5 \cdot 10^5$ Па; 3- $P_{ст} = 4 \cdot 10^5$ Па.

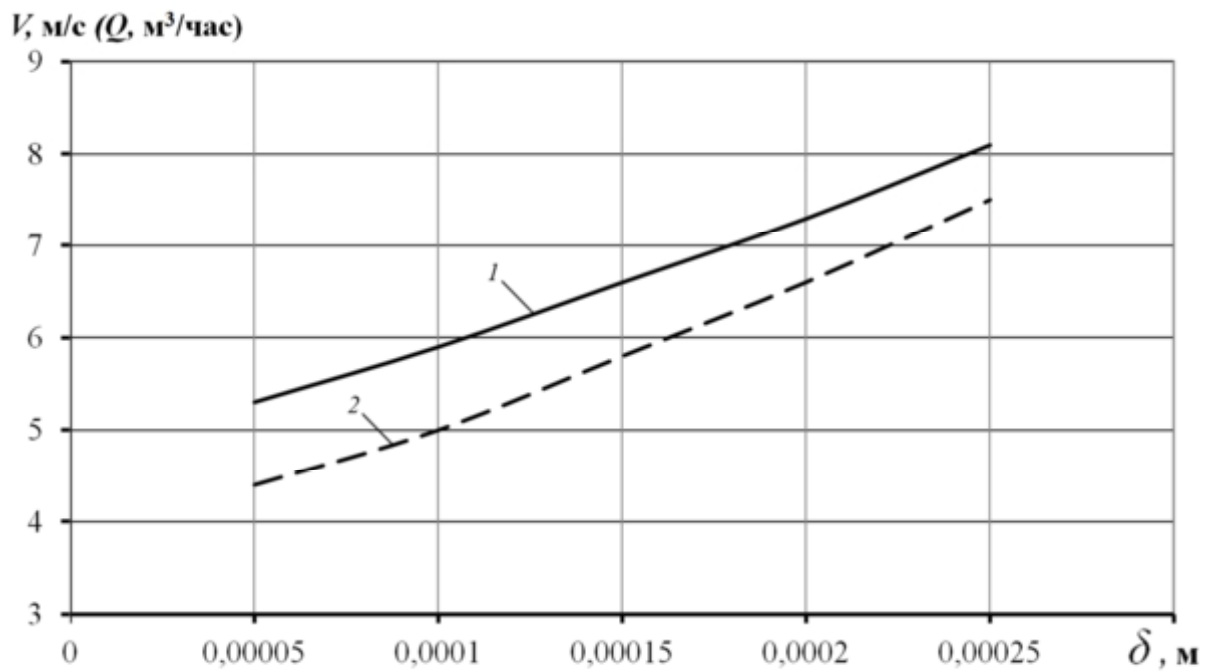


Рис. 7.25. Зависимости скорости и расхода от изменения величины зазора между ротором и статором: 1 – скорость V , м/с; 2 – расход Q , м³/ч.

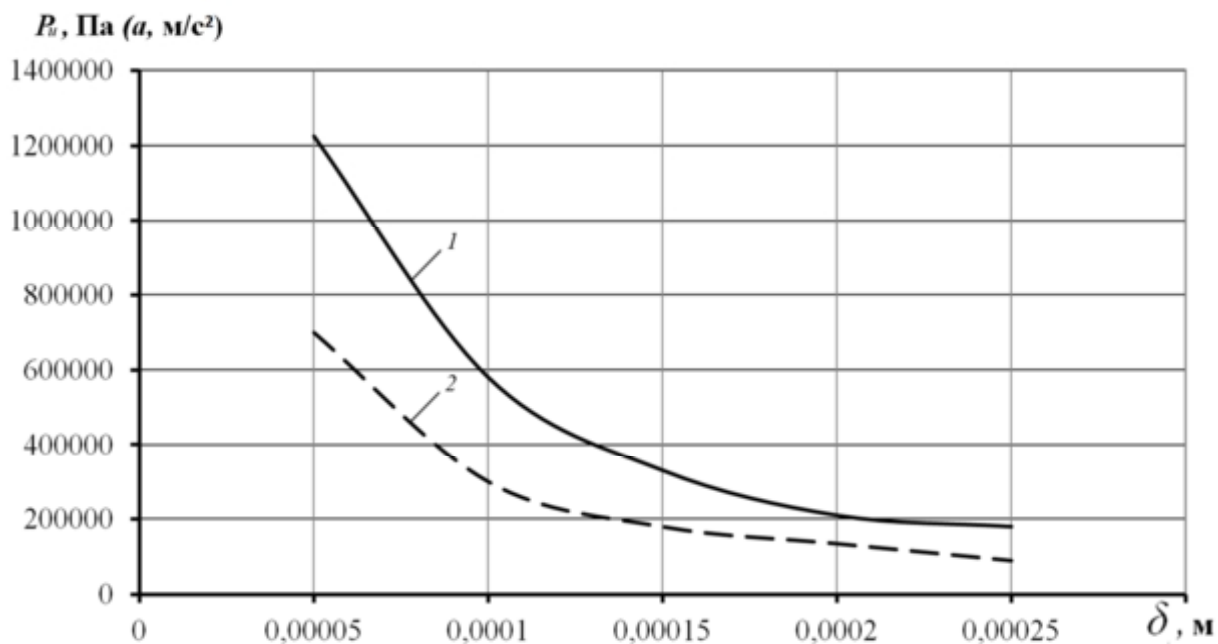


Рис. 7.26. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения величины зазора между ротором и статором: 1 – импульсное давление P_u , Па; 2 – ускорение a , м/с^2 .

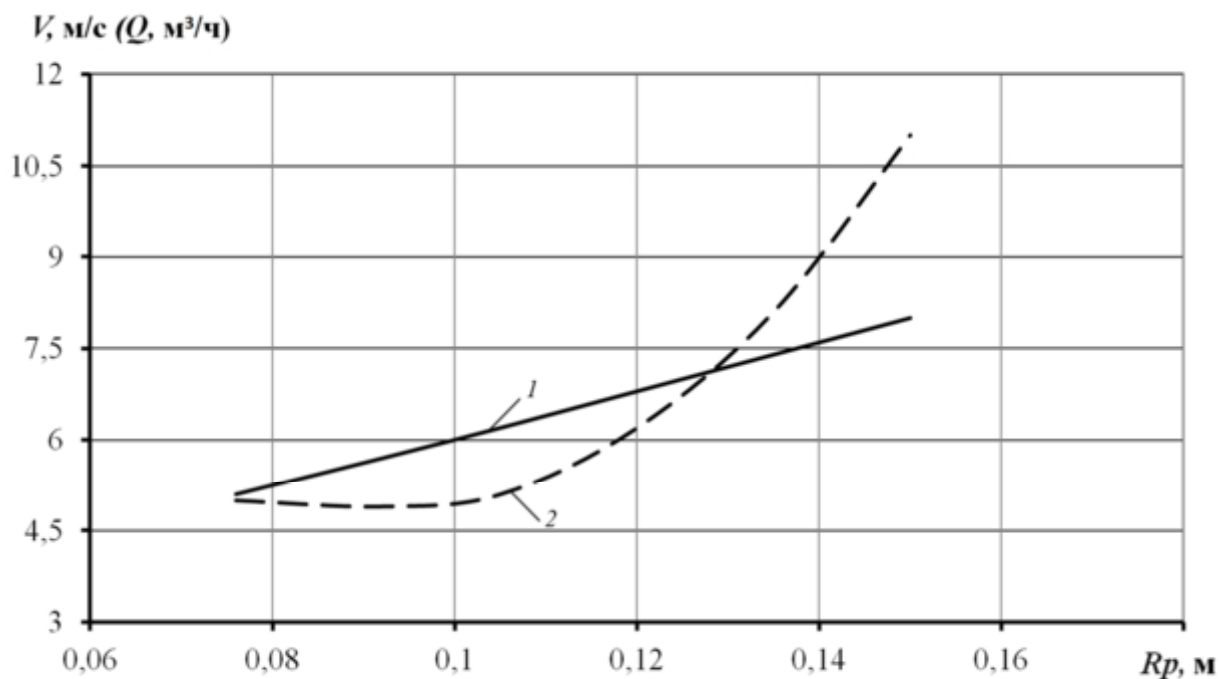


Рис. 7.27 Зависимости скорости и расхода от изменения величины радиуса ротора: 1 – скорость V , м/с ; 2 – расход Q , $\text{м}^3/\text{ч}$.

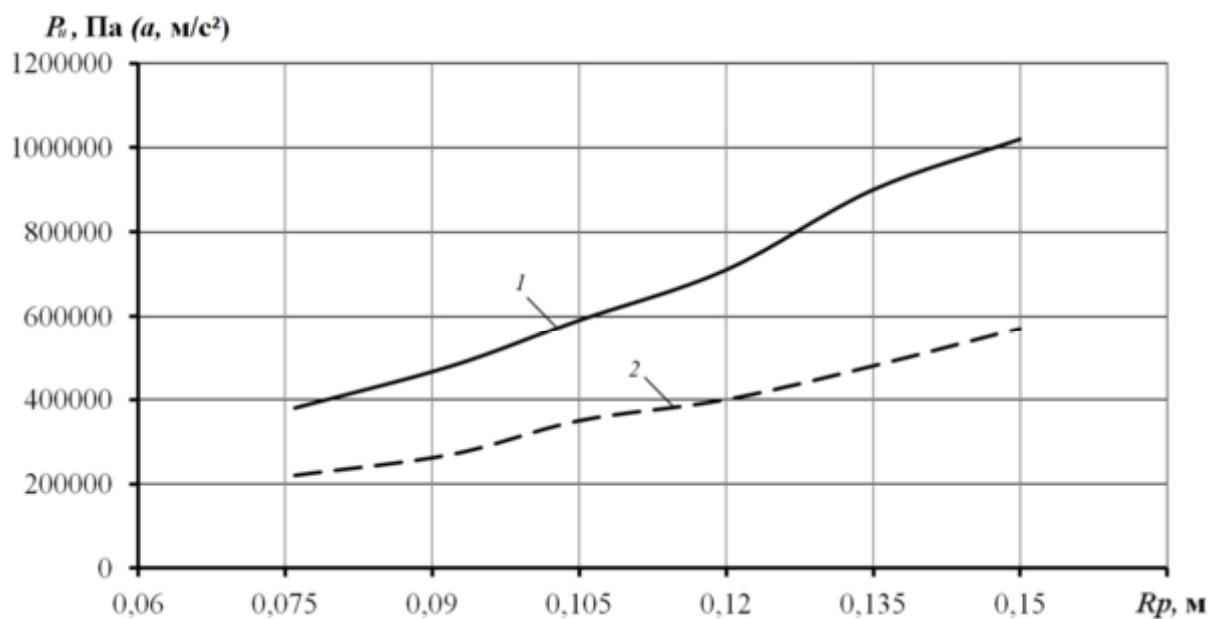


Рис. 7.28. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения величины радиуса ротора: 1 – импульсное давление P_u , Па; 2 – ускорение a , m/s^2 .

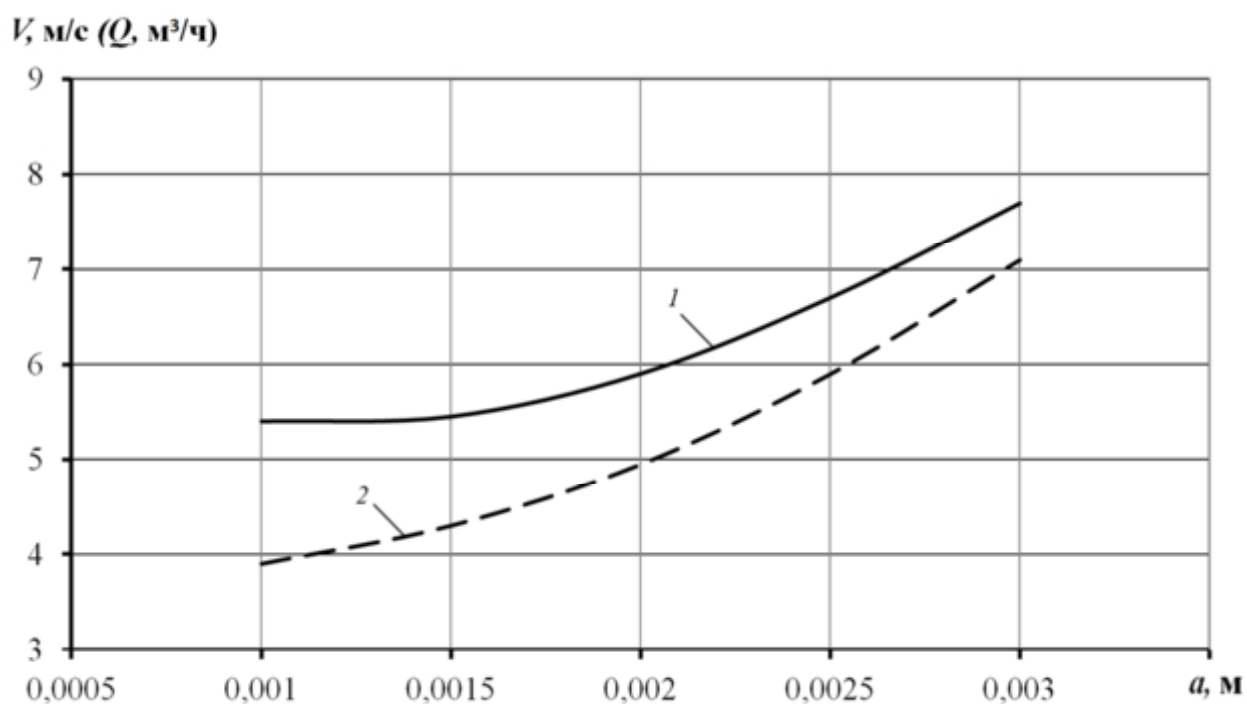


Рис. 7.29. Зависимости скорости и расхода от изменения ширины каналов:

1 – скорость V , м/с; 2 – расход Q , $\text{m}^3/\text{ч}$.

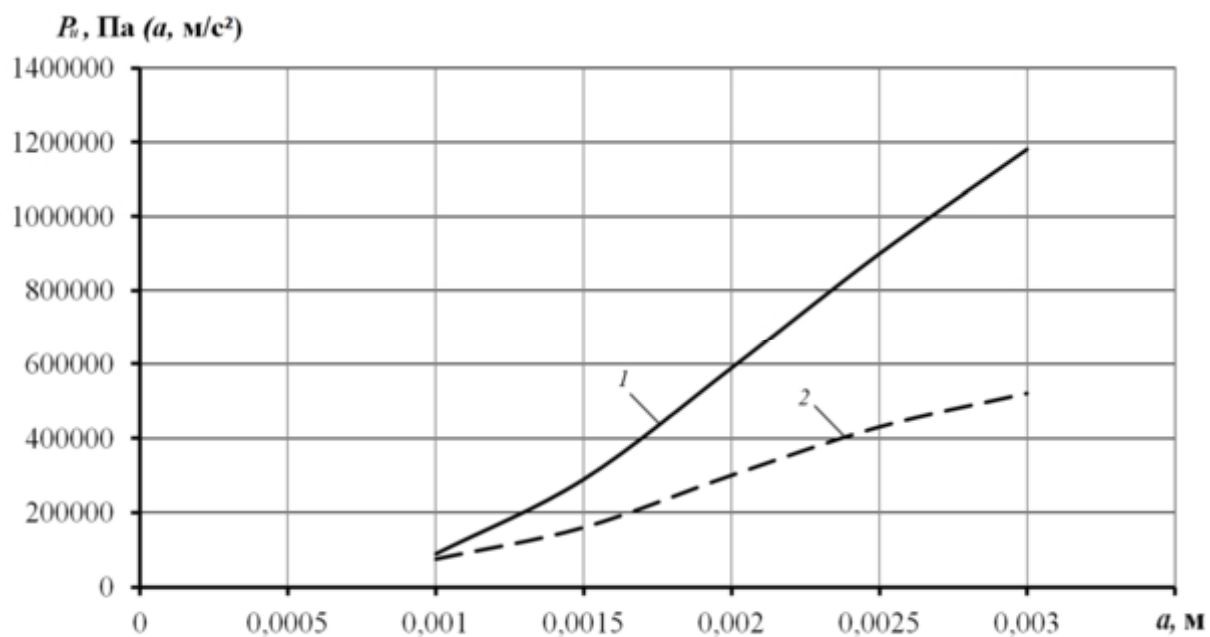


Рис. 7.30. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения ширины каналов: 1 – импульсное давление P_u , Па; 2 – ускорение a , м/с².

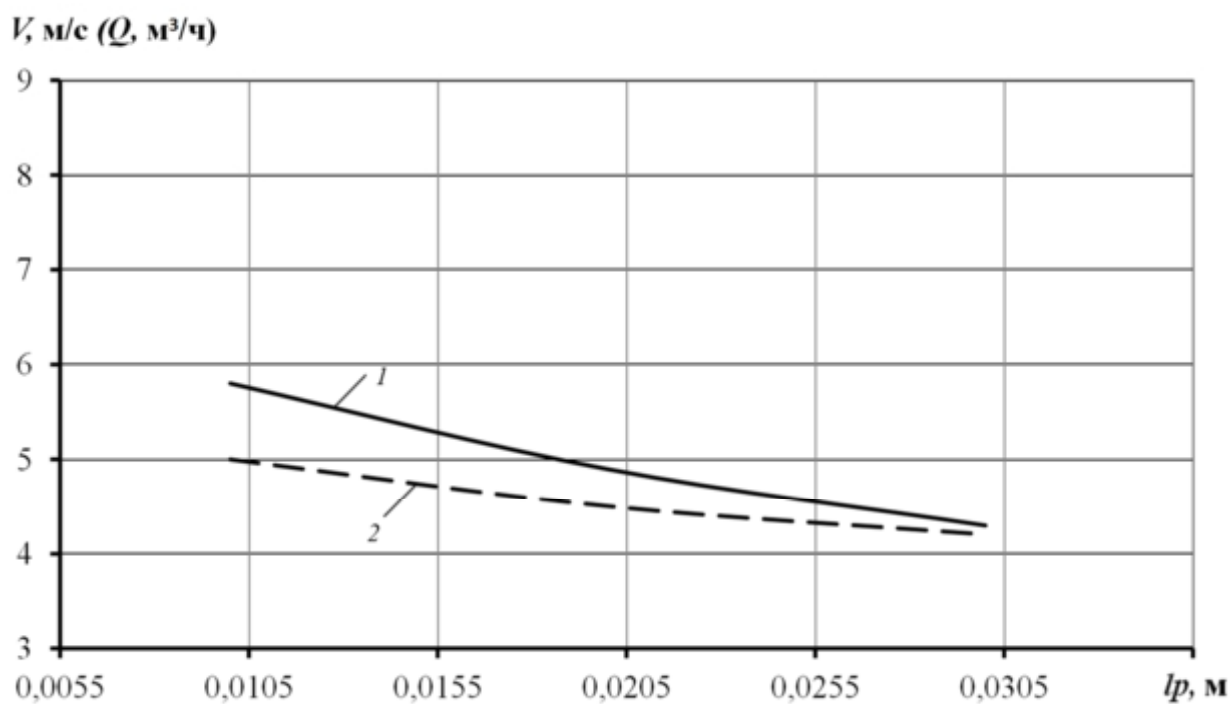


Рис. 7.31. Зависимости скорости и расхода от изменения длины каналов ротора: 1 – скорость V , м/с; 2 – расход Q , м³/ч.

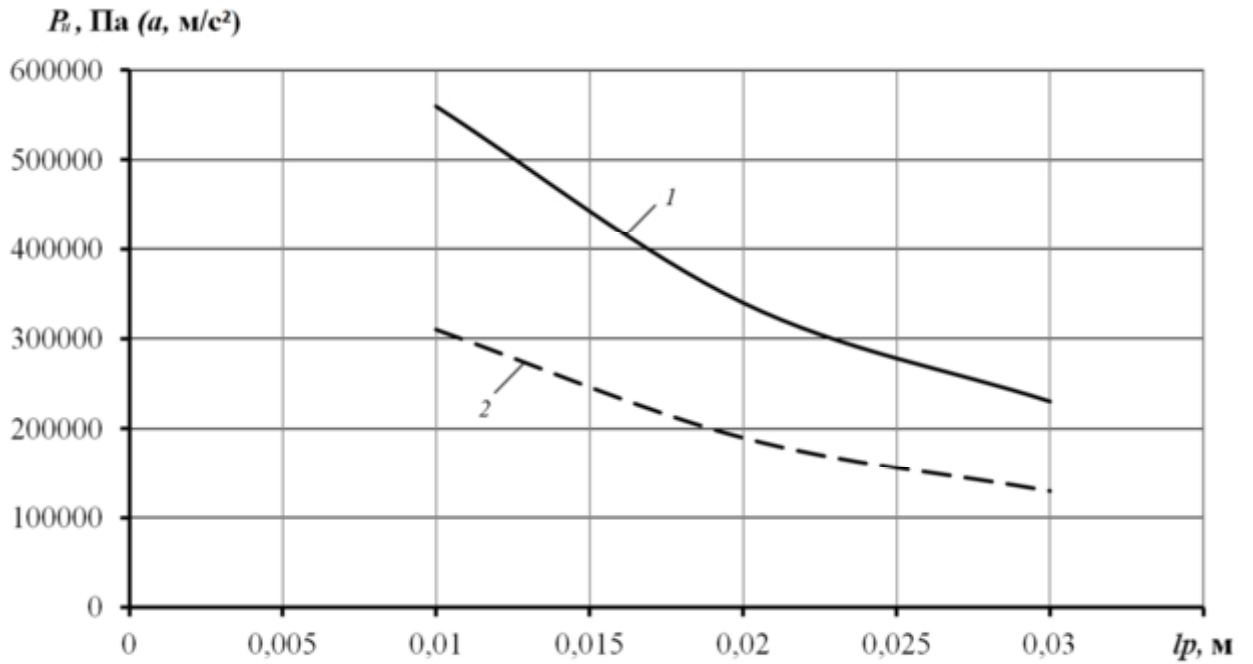


Рис. 7.32. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения длины каналов ротора: 1 – импульсное давление P_u , Па; 2 – ускорение a , м/с².

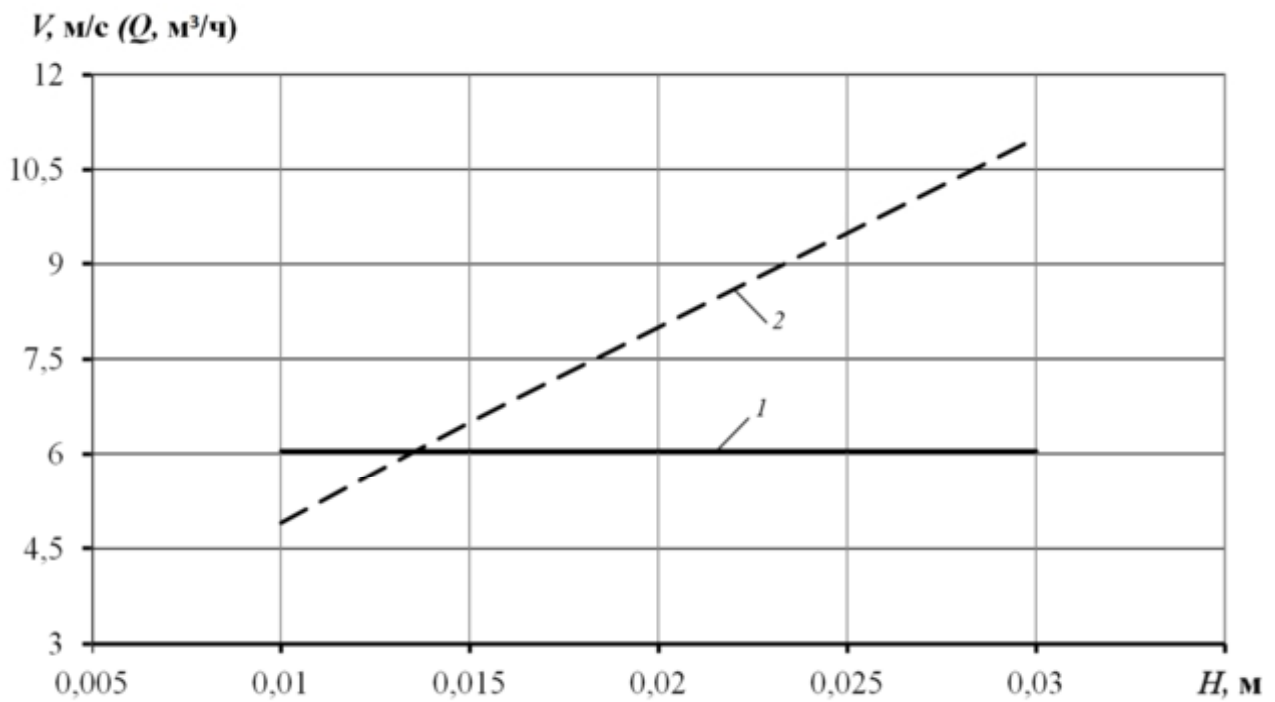


Рис. 7.33. Зависимости скорости и расхода от изменения высоты каналов:

1 – скорость V , м/с; 2 – расход Q , м³/ч.

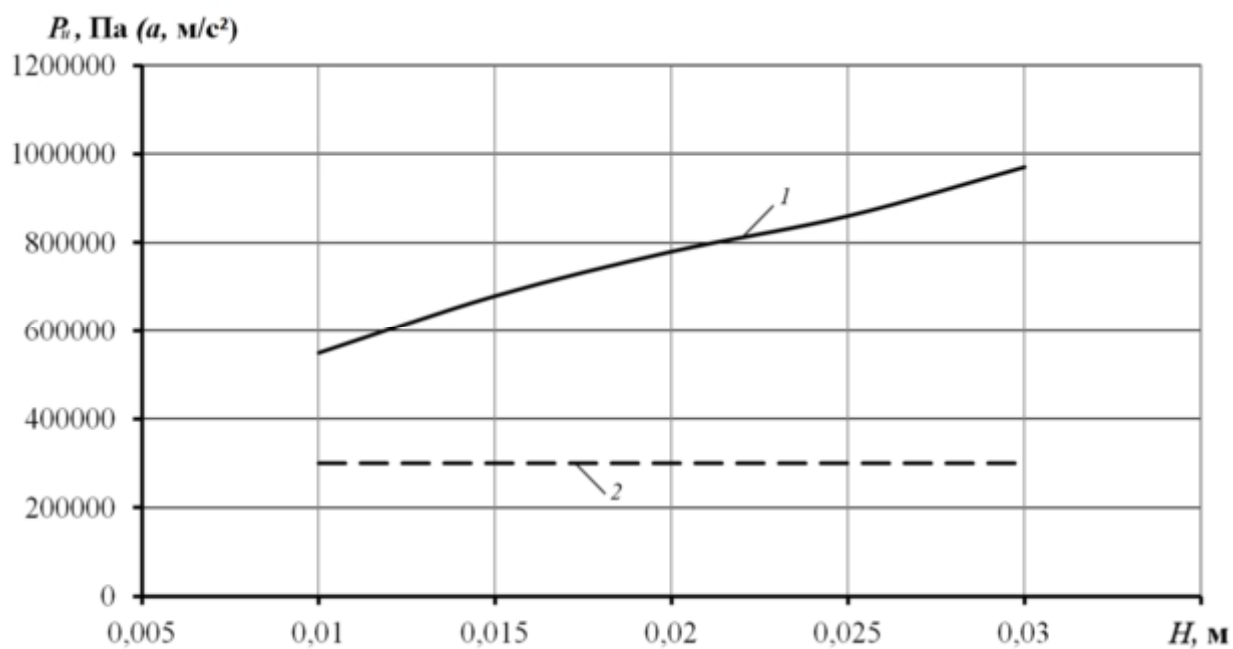


Рис. 7.34. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения высоты каналов: 1 – импульсное давление P_u , Па; 2 – ускорение a , м/с².

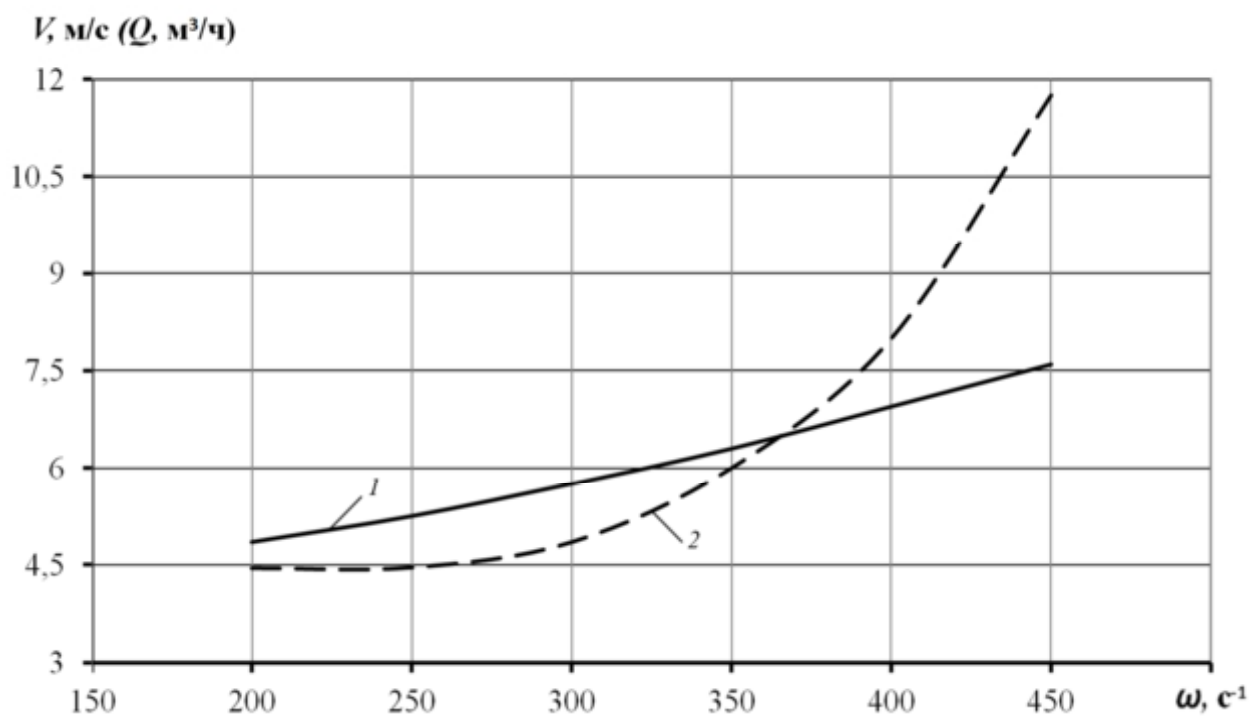


Рис. 7.35. Зависимости скорости и расхода от изменения скорости вращения ротора: 1 – скорость V , м/с; 2 – расход Q , м³/ч.

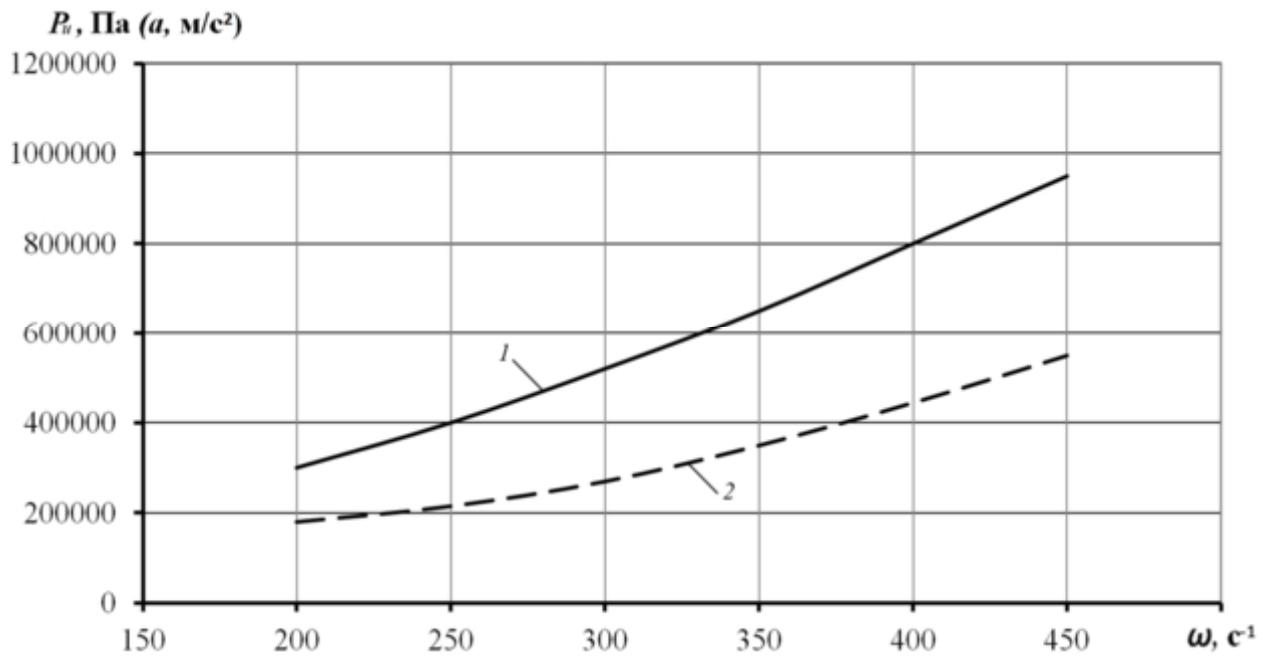


Рис. 7.36. Зависимости ускорения и импульсного давления от скорости вращения ротора: 1 – импульсное давление P_u , Па; 2 – ускорение a , м/с².

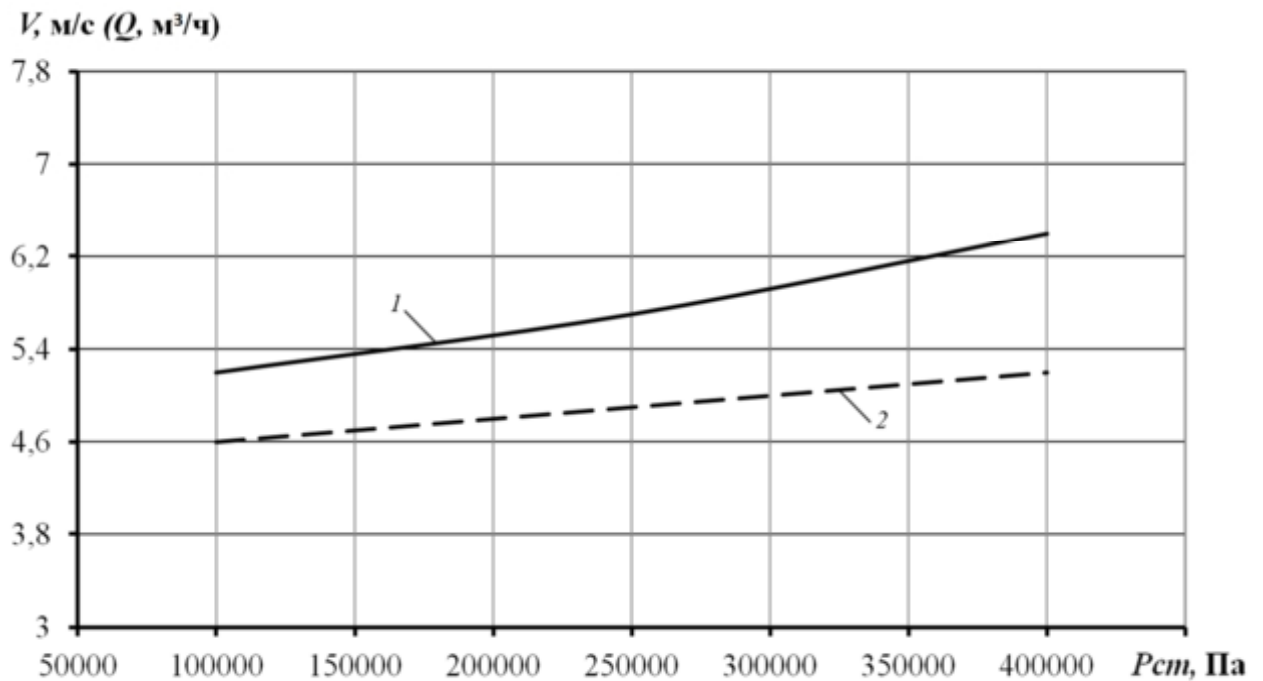


Рис. 7.37. Зависимости скорости и расхода от изменения статического давления:

1 – скорость V , м/с; 2 – расход Q , м³/ч.

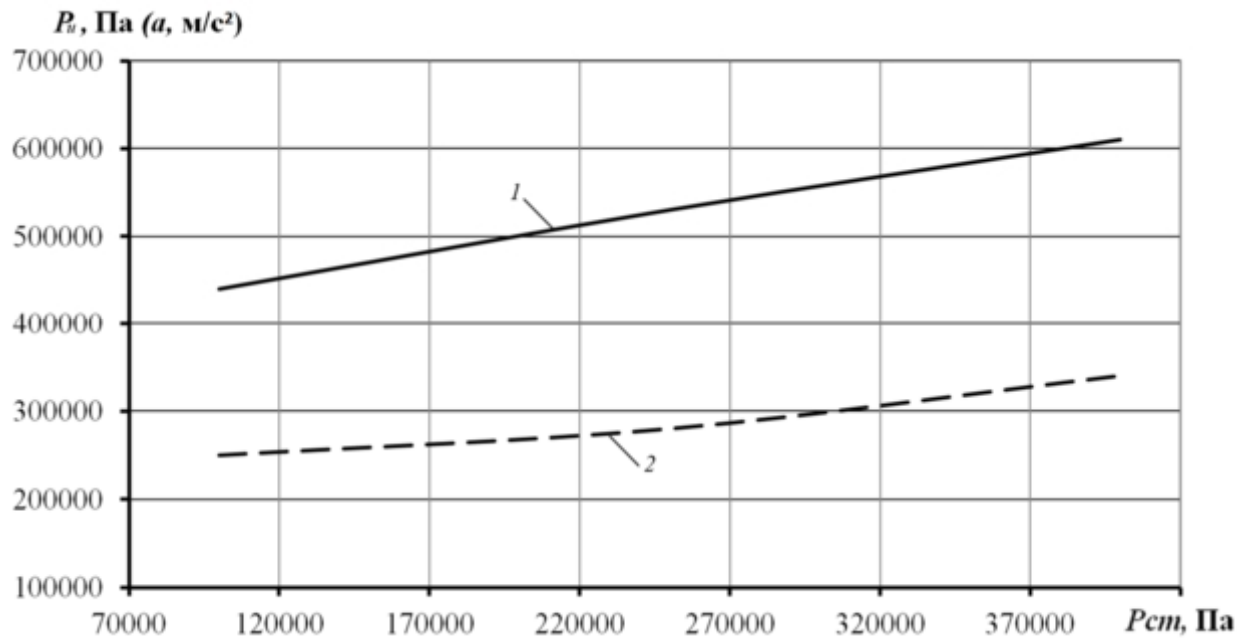


Рис. 7.38. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения статического давления: 1 – импульсное давление P_u , Па: 2 – ускорение a , m/s^2 .

Справка о практическом использовании результатов исследований в ООО «Амальтеа-сервис»



ВОДОУГОЛЬ
СОВРЕМЕННОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

ООО «Амальтеа-Сервис»
119180, г. Москва, ул. Б. Якиманка, д. 1
Тел./Факс +7 (499) 709-7582
Тел +7 (499) 530 1258
Email info@vodougol.ru
Web www.vodougol.ru

Исх. № 294.
От 29.09.2014

СПРАВКА
о практическом использовании результатов исследований

Рекомендации по расчету роторного импульсного аппарата (РИА), разработанные аспирантом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» Степановым Андреем Юрьевичем используются при разработке, проектировании и расчете роторных импульсных аппаратов, которые ООО «Амальтеа-Сервис» изготавливает для технологических линий по обработке суспензий биогумуса, сапропеля, торфа и угля.

Программа расчета полей скоростей и давлений в каналах роторного импульсного аппарата (Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010612236.) позволяет определить основные характеристики аппарата, необходимые для его проектирования, изготовления и дальнейшей эксплуатации.

ООО «Амальтеа-Сервис» совместно с группой ученых ФГБОУ ВПО «ТГТУ» под руководством д.т.н., проф. Промтова М.А., с непосредственным участием аспиранта Степанова А.Ю. разработало проект производства жидких органических удобрений из биогумуса и сапропеля в установке на базе роторного импульсного аппарата, который в настоящее время проходит экспертизу у потенциальных заказчиков и планируется к внедрению.

Генеральный директор, к.т.н.


А.Г. Морозов



ООО «Амальтеа-Сервис», 119180, Москва, ул. Б. Якиманка, д. 1
Тел +7 (499) 709 7582 Факс +7 (499) 530 1258 www.vodougol.ru info@vodougol.ru

Решение о выдаче патента на полезную модель РФ № 147138

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11)

2014117787



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ЗАЯВКА НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

По данным на 10.10.2014 состояние делопроизводства: Экспертиза завершена

(11) Номер патента: 147138

(21) Заявка: 2014117787

(22) Дата подачи заявки: 30.04.2014

Дата поступления: 30.04.2014

Страна заявителя: RU

Исходящая корреспонденция		Входящая корреспонденция	
Уведомление о зачете пошлины	2014.09.23	Платежный документ	2014.09.16
Решение о выдаче патента	2014.07.08		
Уведомление о поступлении документов заявки	2014.04.30	Комплект заявочной документации	2014.04.30
		Платежный документ	2014.04.30

12381
Прометов И. А.

Форма № 01 ПМ-2011

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(РОСПАТЕНТ)

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 123995. Телефон (8-499) 240-60-15. Факс (8-495) 531-63-18

На № - от-
Наш № 2014117787/05(028212)

При переписке просим ссылаться на номер заявки и
сообщить дату получения настоящей корреспонденции
от 08.07.2014

ФГБОУ ВПО "ТГТУ", патентный отдел
ул. Советская, 106
г. Тамбов
392000

РЕШЕНИЕ
о выдаче патента на полезную модель

(21) Заявка № 2014117787/05(028212)

(22) Дата подачи заявки 30.04.2014

В результате экспертизы заявки на полезную модель установлено, что
☒ заявленная полезная модель
☐ заявленная группа полезных моделей
 относится к объектам патентных прав, заявка подана на техническое решение,
 охраняемое в качестве полезной модели, и документы заявки соответствуют
 установленным требованиям, предусмотренным Гражданским кодексом Российской
 Федерации, в связи с чем принято решение о выдаче патента на полезную модель.
 Заключение по результатам экспертизы прилагается.

Приложение: на 4 л. в 1 экз.

Руководитель



Б.П.Симонов



08.08.14 4/1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРТИЗЫ

(21) Заявка № 2014117787/05(028212)

(22) Дата подачи заявки 30.04.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента 30.04.2014

ПРИОРИТЕТ УСТАНОВЛЕН ПО ДАТЕ

(22) подачи заявки 30.04.2014

(72) Автор(ы) Промтов М.А., Степанов А.Ю., Алешин А.В., RU

(73) Патентообладатель(и) Промтоф Максим Александрович, RU

(54) Название полезной модели Роторный импульсный аппарат

(см. на обороте)

01	1	054005
----	---	--------

ВНИМАНИЕ! С целью исключения ошибок просьба проверить сведения, приведенные в заключении, т.к. они без изменения будут внесены в Государственный реестр полезных моделей Российской Федерации, и незамедлительно сообщить об обнаруженных ошибках.

Патент на полезную модель РФ №130877

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **130 877** ⁽¹³⁾ **U1**
(51) МПК
B01F 7/00 (2006.01)

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013107869/05, 21.02.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
21.02.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 21.02.2013

(45) Опубликовано: 10.08.2013 Бюл. № 22

Адрес для переписки:

392000, г.Тамбов, ул. Советская, 106, ФГБОУ
ВПО "ТГТУ", Патентный отдел

(72) Автор(ы):

Промтов Максим Александрович (RU),
Степанов Андрей Юрьевич (RU),
Алешин Андрей Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Промтов Максим Александрович (RU)

(54) РОТОРНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ АППАРАТ

(57) Формула полезной модели

1. Роторный импульсный аппарат, содержащий корпус с входным и выходным патрубками, соосно установленные в нем ротор и статор в форме дисков с радиальными каналами, расположенными по периферии дисков, центральная ось каналов ротора отклонена от центральной оси ротора на угол α , величина которого выбирается из условия $0 < \alpha < 90^\circ$, а также отклонена в сторону, противоположную направлению вращения, от радиального луча, перпендикулярного центральной оси ротора, на угол β , величина которого выбирается из условия $0^\circ < \beta < 90^\circ$, отличающийся тем, что точки пересечения центральных осей каналов статора с поверхностью диска статора, ближней к диску ротора, располагаются на окружности радиусом R_2 , который определяется по формуле $R_2 = R_1 + \delta \cdot \tan \alpha$, где R_1 - радиус окружности точек пересечения центральных осей каналов ротора с поверхностью диска ротора, ближней к диску статора.

2. Роторный импульсный аппарат по п.1, отличающийся тем, что центральная ось каналов статора отклонена от центральной оси статора и ротора на такой же угол α , что и каналы ротора, величина которого выбирается из условия $0 < \alpha < 90^\circ$.

3. Роторный импульсный аппарат по п.2, отличающийся тем, что центральная ось каналов статора отклонена в сторону, противоположную направлению вращения, от радиального луча, перпендикулярного центральной оси статора и ротора, на такой же угол β , что и каналы ротора, величина которого выбирается из условия $0^\circ < \beta < 90^\circ$.

**Справка о практическом использовании результатов исследований
в ООО «Биогумус»**



ООО «Биогумус»

Россия, г. Тамбов, пер. Новорубежный 30
Тел/факс: (4752)75-19-74, 47-40-12,
Тел. 8-910-756-45-17
E-mail: biopioneer@mail.ru

Исх. № 10 от 21.02.2011 г.

СПРАВКА

о практическом использовании результатов исследований,
выполненных аспирантом ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» Степановым Андреем Юрьевичем

Настоящим документом подтверждаю, что аспирантом ГОУ ВПО ТГТУ Степановым А. Ю. разработаны и приняты к внедрению в ООО «Биогумус» рекомендации по приготовлению водной дисперсии биогумуса при помощи роторного импульсного аппарата (РИА).

Внедрение рекомендаций по приготовлению водной дисперсии биогумуса при помощи РИА позволяет увеличить содержание действующего вещества удобрения – гуминовых кислот в воде (в 2 раза), а также получать водную дисперсию биогумуса насыщенную полезными веществами и богатую микрофлорой в виде готового продукта. Расслоение дисперсии практически не происходит, что придаёт этому органическому удобрению высокие потребительские, агрохимические и ростостимулирующие свойства.

Внедрение в производство рекомендаций, предложенных Степановым А. Ю., позволит повысить качество готового продукта, что приведёт к увеличению его конкурентоспособности, увеличению объёма сбыта водной дисперсии биогумуса на сумму не менее 250 тыс. руб. в год.

Директор ООО «Биогумус»



Ириков О.В.

Протокол испытаний №169/176

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИИ
ДЕПАРТАМЕНТ РАСТЕННЕВОДСТВА, ХИМИЗАЦИИ И ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

ФГУ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЦЕНТР АГРОХИМИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ «ТАМБОВСКИЙ»
ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 169/176;197-198-К **выдан “ 12 ” июля 2012г.**

Адрес: 392000 г. Тамбов
ул. Московская 2^б
тел: 71-24-77

Аккредитованная Испытательная
лаборатория по агрохимическому
обслуживанию сельскохозяйственного производства

Регистрационный номер
№ РОСС RU.0001.510141

1. Поставщик, (изготовитель), адрес: ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2. Наименование продукции: водный экстракт гуминовых кислот из биогумуса
3. Дата получения образцов 4.07 и 9.07.2012г
4. Время проведения испытаний с04.07.2012г. по 11.07.2012г.

Наименование анализируемого показателя	Наименование ГОСТа, МУ и др. НД на методы испытаний	ед. измер.	Результат измерения	Допустимое содержание
Обр №1 - I.0, исх. - ленточная мешалка, б/г - 20% вода – 80%				
Гуминовые кислоты	ГОСТ 9517-94	г/1000мл	0,60	
Обр №2 - I.1- ленточная мешалка, 1000 об/мин, б/г - 20% вода – 80%				
Гуминовые кислоты	ГОСТ 9517-94	г/1000мл	0,69	
Обр №5 - V. 1.РИА- 250; 2000 об/мин - б/г- 20% вода – 80%				
Гуминовые кислоты	ГОСТ 9517-94	г/1000мл	0,69	
Обр №4 - III. 1.РИА- 250, 3000 об/мин б/г 20% вода – 80%				
Гуминовые кислоты	ГОСТ 9517-94	г/1000мл	1,28	
Обр №7 – 0, исх. , ленточная мешалка, б/г 20% вода – 79% , щелочь – 1%				
Гуминовые кислоты	ГОСТ 9517-94	г/1000мл	0,65	
pH	ГОСТ 26483-85		12,6	
Обр №8 - 1. - ленточная мешалка, 1000 об/мин, б/г - 20% вода – 79% , щелочь -1%				
Гуминовые кислоты	ГОСТ 9517-94	г/1000мл	1,38	
pH	ГОСТ 26483-85		12,5	
Обр №10 - IV.1., РИА -250; 3000 об/мин, б/г- 20%, вода – 79% , щелочь -1%				
Гуминовые кислоты	ГОСТ 9517-94	г/1000мл	4,21	
pH	ГОСТ 26483-85		12,5	

начальник Испытательной лаборатории

Бабешко А.Д.

* настоящий протокол не может быть скопирован/дублирован Испытательной лабораторией
** настоящий протокол действителен на образец подтвержденной идентичности