

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

**М. А. ПРОМТОВ, А. Ю. СТЕПАНОВ, А. В. АЛЕШИН**

# **МЕТОДЫ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА**

Утверждено Научно-методическим советом университета  
в качестве монографии



---

Тамбов  
◆ Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» ◆  
2015

УДК 62.-13.66

ББК 11-5-02

П81

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Машины и аппараты химических производств» ФГБОУ ВПО  
«Воронежский государственный университет инженерных технологий»  
*С. Ю. Панов*

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
общеобразовательных дисциплин военного института  
(общевойскового) ВУНЦ СВ «Общевойсковая академия ВС РФ»  
*А. И. Зимин*

**Промтов, М. А.**

П81 Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата : монография / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 148 с. – 120 экз. – ISBN 978-5-8265-1442-9.

В монографии рассмотрены методы расчета основных характеристик роторного импульсного аппарата (РИА) с применением компьютерных технологий. Выполнен анализ методов расчета геометрических и технологических параметров, закономерностей гидродинамических характеристик, методов интенсификации химико-технологических процессов в РИА. Описаны методы расчета основных характеристик РИА на основе численного решения нестационарного уравнения Бернулли и уравнений Навье–Стокса с применением программного комплекса ANSYS CFX.

Монография будет полезна ученым и инженерам, работающим в области энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования для химических, пищевых, фармацевтических, нефтеперерабатывающих и других производств, а также студентам и аспирантам.

УДК 62.-13.66

ББК 11-5-02

ISBN 978-5-8265-1442-9

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО ТГТУ), 2015

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

---

$a$  – ширина канала, м;  
 $B$  – коэффициент гидравлических потерь;  
 $b$  – расстояние между двумя ближайшими стенками соседних каналов, м;  
 $c$  – скорость звука, м/с;  
 $C$  – коэффициент;  
 $d$  – диаметр, м;  
 $E$  – энергия, Дж;  
 $h$  – высота канала, м;  
 $k, K$  – коэффициент;  
 $l$  – длина, м;  
 $m$  – масса;  
 $N$  – мощность, Вт;  
 $n$  – частота вращения ротора, об/с;  
 $P$  – давление, Па;  
 $Q$  – расход, м<sup>3</sup>/с;  
 $R$  – радиус, м;  
 $r$  – расстояние, м;  
 $S$  – площадь, м<sup>2</sup>;  
 $t, T$  – время, с; температура, К;  
 $V$  – скорость, м/с;  
 $x$  – координата, м;  
 $y$  – координата, м;  
 $z$  – число каналов;  
 $\delta$  – зазор между ротором и статором, м;  
 $\lambda$  – коэффициент сопротивления трению;  
 $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  
 $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  
 $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v$  – объем, м<sup>3</sup>;  
 $\omega$  – угловая скорость, с<sup>-1</sup>;  
 $\xi$  – коэффициент местного гидравлического сопротивления;  
 $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м.

### Индексы:

$i$  – импульсный  
 $r$  – ротор;  
 $s$  – статор;  
 $ст$  – статический;  
 $к$  – камера;  
 $ц$  – центробежный;  
 $э$  – эквивалентный;  
 $m$  – амплитудный;  
 $min$  – минимальный;  
 $max$  – максимальный.

## ВВЕДЕНИЕ

---

Интенсификация химико-технологических процессов и повышение эффективности технологического оборудования является одной из приоритетных задач развития науки и техники. Основой повышения качества продукции, увеличения производительности и снижения энергозатрат на проведение химико-технологических процессов служит разработка высокоэффективных технологических аппаратов с оптимальной удельной энерго- и материалоемкостью, высокой степенью воздействия на обрабатываемые вещества. В настоящее время перспективным научно-техническим направлением является разработка высокоэффективных аппаратов с многофакторным воздействием на обрабатываемую среду за счет дискретного ввода в рабочую зону массы и энергии большой плотности.

К аппаратам, реализующим метод дискретного, многофакторного энергетического воздействия на химико-технологические процессы, относят пульсационные (импульсные) аппараты, принцип работы которых основан на нестационарности потоков вещества, энергии и импульса.

Роторные импульсные аппараты (РИА) являются эффективным оборудованием для многофакторного импульсного воздействия на гетерогенную жидкость с целью получения стабильных, высокодисперсных эмульсий и суспензий, интенсификации процессов растворения и экстрагирования веществ, изменения физико-химических параметров жидкости, деструкции молекулярных соединений.

Роторный импульсный аппарат предназначен для структурных преобразований жидкости на микро- и наноуровне с целью изменения ее физико-химических параметров, интенсификации массообменных и гидромеханических процессов. Обработка жидкости в РИА осуществляется за счет импульсного многофакторного воздействия: вихреобразования, микромасштабных пульсаций давления, интенсивной кавитации, ударных волн и нелинейных гидроакустических эффектов. РИА осуществляет преобразование энергии низкой концентрации в энергию высокой локальной концентрации в неустойчивых точках структуры вещества. Пространственная и временная концентрация энергии позволяет получить большую мощность импульсного энергетического воздействия, совершить энергетическую накачку, высвободить внут-

ренную энергию вещества, инициировать многочисленные квантовые, каталитические, цепные, самопроизвольные, лавинообразные и другие энергонасыщенные процессы.

РИА используются для обработки таких систем, как «жидкость–жидкость», «жидкость–твердое тело» и «газ–жидкость» за счет широкого спектра факторов воздействия:

- механическое воздействие на частицы гетерогенной среды, заключающееся в ударных, срезающих и истирающих нагрузках и контактах с рабочими частями РИА;

- гидродинамическое воздействие, выражающееся в больших сдвиговых напряжениях в жидкости, развитой турбулентности, пульсациях давления и скорости потока жидкости;

- гидроакустическое воздействие на жидкость осуществляется за счет мелкомасштабных пульсаций давления, интенсивной кавитации, ударных волн и нелинейных акустических эффектов.

Технологии и технологические комплексы на базе РИА позволяют получать высококачественные технологические, пищевые и биологически активные растворы, экстракты, эмульсии и суспензии. К таким системам относятся: овощные и фруктовые соки, пюре, пасты, майонезы, гомогенизированное и восстановленное молоко, йогурты, мази, кремы, системы, содержащие биологически активные вещества (пектин, танин, аминокислоты, вытяжки и экстракты), водотопливные эмульсии и суспензии; лакокрасочные материалы и т.п. В технологические комплексы кроме РИА входят стандартное оборудование для дозирования, нагнетания и подачи жидкостей и компонентов продукта, их нагрева и охлаждения, емкости предварительного смешивания и временного хранения компонентов.

РИА используются для гомогенизации и пастеризации молока. При гомогенизации молока 90% жировых шариков имеют размер до 2 мкм. Кавитационное воздействие не только способствует повышению дисперсности эмульсии, но и уничтожает вредные микроорганизмы. При этом происходит полное уничтожение вегетативных форм дрожжей и плесеней, а также патогенных микроорганизмов группы кишечной палочки и нейтрализация фосфатазы.

При обработке в РИА осуществляется дезинфекция сточных вод и жидких органических удобрений на основе торфа. В результате импульсной многофакторной, преимущественно кавитационной обработки, происходит уменьшение общей численности бактерий и грибных

спор, снижение уровня присутствия жизнеспособных грибных колониеобразующих единиц. Многофакторная обработка суспензий сапропеля, торфа, биогумуса в роторном импульсном аппарате повышает выход гуминовых веществ в несколько раз, по сравнению с обработкой суспензии в емкости с ленточной мешалкой. Приготовление водной дисперсии биогумуса, торфа или сапропеля с помощью роторного импульсного аппарата позволяет увеличить содержание действующего вещества удобрения – гуминовых веществ в воде, а также получать стабильную водную дисперсию в виде готового продукта, насыщенного полезными веществами и богатой микрофлорой, что придает этому органическому удобрению высокие потребительские, агрохимические и ростостимулирующие свойства.

Перспективным направлением использования РИА является экстрагирование продуктов микробиологического синтеза, например пектина, каротина, танина и других ценных веществ из биомассы. Многие лекарственные вещества получают методами экстрагирования при обработке в РИА сырья растительного и животного происхождения. Применение РИА позволяет повысить качество мягких лекарственных форм суспензионного и эмульсионного типа. РИА нашли применение в решении некоторых технологических и экологических задач ряда производств рыбо-, мясоперерабатывающей промышленности и в переработке молочного «обрата», которые связаны с выделением жировой фракции из белково-липидных комплексов, содержащих до 30% жира.

Одним из новых методов повышения реакционной способности крахмала является использование гидродинамического воздействия при обработке клейстиризованного крахмала в РИА. При наложении интенсивных гидродинамических пульсаций и кавитации скорость кислотного гидролиза клейстиризованного крахмала увеличивается в среднем на три порядка. Основным фактором активации системы является кавитация, структурные изменения в гидрогелях крахмала за счет механического воздействия вызывают увеличение скорости реакции в пределах одного порядка.

Экспериментальные исследования показали высокую эффективность РИА для проведения процессов абсорбции диоксида углерода и диспергирования азота в воде, диспергирования серы в масле, характеризующимся большой маслянистостью, прозрачностью и отсутствием запаха серы.

Перспективным направлением в энергетике является использование дисперсионно-топливных систем. РИА служат эффективным средством для получения водоугольных суспензий и угольно-масляных паст. Использование качественных углемазутных суспензий позволяет уменьшить расход мазута на 20...25%. Сжигание углемазутных и водоугольных суспензий позволяет снизить вредные выбросы ( $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ), утилизировать угольный шлак, снизить себестоимость получения тепловой и электрической энергии.

В высоковязких мазутах содержится вода в виде отдельных местных скоплений. Использование в качестве топлива специально приготовленных водомазутных эмульсий является одним из эффективных методов, позволяющих решить эту проблему. Одной из применяемых технологий для использования в котлах малой и средней мощности является технология с использованием РИА.

При сжигании водомазутных эмульсий получают существенный экономический эффект, повышение КПД на 3...5% и снижение эмиссии загрязняющих веществ ( $\text{CO}$ , сажи, окислов азота, бензапирена и других канцерогенных полициклических ароматических углеводородов) в атмосферу. Длинные молекулярные цепи преобразовываются в легкие углеводородные радикалы газовых, дистиллятных топливных фракций. Наибольший экономический эффект и одновременное снижение газовых выбросов обеспечивает добавление в топливо 10...15% воды, а наибольший экологический эффект в части утилизации загрязненных органическими продуктами вод реализуется при уровне водной фазы до 50%.

Обеспечивается возможность сжигания некондиционных высоковязких и обводненных мазутов. В качестве водной фазы можно использовать загрязненные промышленные стоки предприятий. При повышении содержания воды в эмульсии свыше 20% по объему качественные показатели процесса горения снижаются по сравнению с горением чистого топлива. Однако если учесть, что процесс сгорания водотопливной эмульсии (ВТЭ) достаточно стабилен при более высоком содержании воды (до 40...50%) в зависимости от вида топлива, открывается возможность уничтожения (огневого обезвреживания) жидких стоков производства.

Импульсное энергетическое воздействие на нефть и нефтепродукты позволяет увеличить выход легколетучих фракций при атмо-

сферной перегонке. Применяя импульсное энергетическое воздействие из тяжелой нефти, можно получить 20...30% бензина, 40...50% дизельного топлива, 20...30% мазута, битума и других тяжелых товарных продуктов. Кавитационная обработка ускоряет диффузию нефти в полости парафина, интенсифицирует процесс его разрушения. Ускорение растворения парафина идет за счет интенсификации перемешивания нефти на границе нефть–парафин и действия импульсов давления, которые как бы разбрызгивают частицы парафина. Кавитация разрывает непрерывную цепочку, разрушая связи между отдельными частями молекул, влияет на изменение структурной вязкости, т.е. на временный разрыв Ван-дер-ваальсовых связей. Под воздействием кавитации большой интенсивности на протяжении длительного времени нарушаются С–С-связи в молекулах парафина, вследствие чего происходят изменения физико-химического состава (уменьшение молекулярного веса, температуры кристаллизации и др.) и свойств нефтепродуктов (вязкости, плотности, температуры вспышки и др.). В процессе импульсной кавитационной обработки нефти и нефтепродуктов энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, используется для разрыва химических связей между атомами больших молекул углеводородных соединений.

Многофакторное импульсное энергетическое воздействие на мазуты позволяет снизить вязкость на 20...30%, увеличить температуру вспышки на 5...10%. После кавитационной обработки в РИА в мазуте образуется до 35% дизельного топлива (температура отгонки 250...290 °С). Экспериментальные исследования показали, что обработанная в РИА нефть начинает перегоняться под атмосферным давлением при температуре ниже на 10...15 °С, чем необработанная нефть, 50% необработанной нефти перегоняется при температуре 328 °С, а 50% обработанной нефти перегоняется при температуре 265 °С под атмосферным давлением, что ниже на 63 °С.

Экспериментальные исследования по импульсной многофакторной обработке рапсового и подсолнечного масел в РИА показали, что обработанные масла имеют отличные от исходного масла физико-химические характеристики. Обработанные рапсовое и подсолнечное масла разделяются на фракции различной летучести с большим процентом выхода, отличаются от исходного пониженной вязкостью, повышенной температурой вспышки.

Теплогенераторы на базе РИА – это новое поколение тепловых машин, преобразующих механическое и акустическое воздействия на жидкость в тепло. Нагрев теплоносителя осуществляется при преобразовании кинетической энергии жидкости в тепловую энергию за счет трибозффекта; преобразовании гидроакустической энергии в тепловую энергию за счет кавитационных и вихревых эфффектов.

Кавитационные теплогенераторы могут также использоваться для процесса очистки от накипеобразования, различных отложений и загрязнений на внутренних поверхностях и в труднодоступных местах технологического оборудования и трубопроводов. Кавитационная обработка воды изменяет ее физико-химические свойства, увеличивает рН воды, способствует ее активации. В результате кавитационного воздействия вода временно становится активным растворителем труднорастворимых веществ без введения химических реагентов.

Одной из актуальных задач современной трибологии является разработка новых экономически безопасных смазочных материалов. Так, например, заменой широко используемых нефтемасляных базовых смазок могут быть силикатомасляные составы, представляющие собой многокомпонентные дисперсии коллоидного характера. Одной из проблем при получении таких смазок является приготовление состава с высокой стабильностью. Использование РИА для получения силикатного масла для редукторных механизмов показало его высокую эфффективность. Использование РИА для получения смазочно-охлаждающих жидкостей способствует повышению их качества, а также снижает энергозатраты в процессе их производства, позволяет уменьшить расход режущего инструмента, повысить качество обработки поверхности, уменьшить коррозию станочного оборудования.

РИА применяется для завершения роспуска волокнистых материалов и для расщепления пучков волокон при переработке грубых волокнистых материалов. Цементно-водная суспензия, подвергнутая кавитационной обработке в РИА и добавленная в бетонную смесь, повышает прочность на сжатие и растяжение изделий из бетона. Использование РИА для получения устойчивых и высокодисперсных эмульсий и паст, вводимых в бетон, позволяет увеличить прочность бетона на 15...20%.

Для получения железобетона с высокими эксплуатационными свойствами для строительных, морских и других сооружений проводят химизацию бетона комплексными добавками. В качестве комплексных

добавок смесей из гидрофобилизирующих поверхностно-активных веществ применяют коллоидную парафиновую пасту. Она представляет собой комплексное соединение двух различных по своей химической природе веществ – воды (полярного растворителя) с парафином (неполярным гидрофобным веществом).

Таким образом, роторные импульсные аппараты – это перспективное и эффективное оборудование для интенсификации технологических процессов в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности с высокой степенью воздействия на обрабатываемые вещества.

РИА достаточно просты в конструкции, их изготовление не требует сложных технологий, они надежны и эффективны в эксплуатации. Низкая энергоемкость РИА обусловлена тем, что обрабатываемая жидкость является одновременно и источником, и объектом гидромеханических колебаний. В РИА отсутствуют промежуточные трансформаторы энергии, механическая энергия непосредственно преобразуется в акустическую и кавитационную энергию. Высокоэнергетическое дискретное воздействие на обрабатываемые вещества в РИА инициирует их качественные преобразования, активацию жидкости.

В то же время, в связи со сложностью и многообразием всего комплекса многофакторного воздействия на обрабатываемую жидкость в РИА, актуальными являются такие проблемы: всестороннее исследование физических, физико-химических и химических явлений, имеющих место в РИА при обработке жидких гетерогенных сред под воздействием мощных пульсационных течений, импульсной акустической кавитации, автоколебательных и резонансных эффектов, 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 высокоэнергетическим воздействием; исследование комплексного воздействия на обрабатываемую гетерогенную жидкость различных физических факторов, интенсифицирующих химико-технологические процессы.

В первой главе выполнен анализ методов интенсификации химико-технологических процессов, выполнена классификация технологических процессов, реализуемых в РИА, описан принцип работы РИА, выполнен анализ факторов воздействия на жидкую гетерогенную сре-

ду в РИА, гидромеханических и гидроакустических эффектов, возникающих при работе аппарата, приведены примеры практического применения РИА для интенсификации гидромеханических и массообменных процессов в гетерогенных жидкостях.

Во второй главе приведена классификация роторных пульсационных (импульсных) аппаратов, выполнен анализ методов расчета геометрических и технологических параметров РИА, описана методика расчета основных характеристик РИА, представлены результаты экспериментов, подтверждающих адекватность разработанных формул и методов расчета гидродинамических параметров.

В третьей главе рассмотрены методики расчета основных характеристик РИА на основе численного решения нестационарного уравнения Бернулли и уравнений Навье–Стокса с применением программного комплекса ANSYS CFX. Выполнен анализ закономерностей гидродинамических характеристик от основных геометрических и режимных параметров РИА.

Монография будет полезна ученым и инженерам, работающим в области энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования для химических, пищевых, фармацевтических, нефтеперерабатывающих и других производств, а также студентам и аспирантам.

# 1. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РОТОРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ АППАРАТАХ

---

## 1.1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Под интенсификацией производственных (технологических) процессов в широком смысле понимают получение прямого или косвенного экономического эффекта за счет увеличения производительности, КПД, уменьшения энерго- и материалоемкости оборудования, длительности лимитирующих стадий, повышения качества продукта, эргономических и социальных показателей.

Все перечисленные параметры являются технико-экономическими и социальными характеристиками (целевыми функциями) интенсификации. При интенсификации химико-технологических процессов (ХТП) предпринимают целенаправленное изменение какой-либо группы факторов, которые оказывают влияние на целевые функции.

Все эти технико-экономические показатели во многом взаимосвязаны друг с другом. Так, уменьшение длительности лимитирующих стадий технологического процесса обычно приводит к увеличению производительности, уменьшению энерго- и материалоемкости, способствует росту КПД.

Различают два вида задач интенсификации [1]:

- 1) совершенствование существующих химико-технологических систем (ХТС);
- 2) разработка принципиально новых ХТС.

Под химико-технологической системой понимают химико-технологические процессы, реализуемые в технологическом оборудовании.

Возможны несколько вариантов результатов интенсификации ХТП [2]:

- интенсификация способствует ускорению ХТП при ухудшении качества продукта, например, ускорение процесса отстаивания за счет увеличения скорости потока жидкости в проточном отстойнике приводит к увеличению производительности, но не позволяет полностью разделить гетерогенную жидкость;
- интенсификация способствует ускорению ХТП при неизменном качестве продукта, например, увеличение скорости обмывания дисперсных частиц при растворении ускоряет процесс, но предельная

концентрация раствора не позволяет изменить содержание количества вещества в объеме жидкости;

– интенсификация увеличивает скорость ХТП и улучшает качество продукта, например, интенсификация процесса эмульгирования позволяет получить эмульсию с меньшими размерами частиц.

Для количественной характеристики интенсивности ХТП используют выражение  $i = M/(St)$ , которое показывает количество перенесенного вещества (энергии)  $M$ , кг (Дж), через единицу площади (объема)  $S$ , м<sup>2</sup> (м<sup>3</sup>), за единицу времени  $t$ , с [3 – 5].

Сформулировав зависимость  $i$  от основных геометрических и режимных параметров ХТС, физических параметров обрабатываемой среды, определяют необходимость увеличения или уменьшения указанных параметров для увеличения  $i$  [3].

Линейные законы переноса типа  $dM/dt = kSF$ , где  $F$  – движущая сила процесса;  $k$  – коэффициент скорости технологического процесса, могут быть использованы для анализа процесса интенсификации только в предположении о незначительности отклонения рассматриваемого процесса от состояния термодинамического равновесия и малости градиентов потенциалов переноса.

Для большинства теплообменных, ряда гидромеханических процессов при инженерных решениях по выбору факторов, на которые необходимо воздействовать для увеличения  $i$ , можно использовать пропорциональность  $M$  параметрам  $S$ ,  $F$  и  $k$ . Обычно для интенсификации теплообменных процессов применяют перемешивание, организацию потоков и специальные физические эффекты. Для интенсификации механических и гидромеханических процессов необходимо активное влияние на движение отдельных элементов жидкости, газа и твердых тел.

Методы интенсификации ХТП разделяют на комплексные, при которых ХТС рассматривают как единое целое, и декомпозиционные методы, выявляющие и классифицирующие отдельные стадии ХТП или элементы технологического оборудования (ТО) [3].

Декомпозиционные методы можно разделить на две, тесно связанные между собой группы: режимно-технологические и аппаратурно-конструктивные.

Режимно-технологические методы интенсификации предполагают изменение технологии производства и режимных параметров ХТП. Аппаратурно-конструктивные методы требуют изменение конструкции или геометрических параметров ТО.

Выделяют также методы пассивные, которые не требуют прямых затрат внешней энергии, и активные, которые требуют затрат внешней энергии.

Между режимными и конструктивными, активными и пассивными методами нельзя провести четкую границу. Пассивные методы также требуют затрат энергии, но энергия расходуется не в явном виде. Использование нового для ХТП режимного метода, как правило, сопряжено с определенными изменениями ТО с использованием конструктивных методов.

Методика интенсификации ХТП при импульсных энергетических воздействиях базируется на синергетическом подходе [2]. Синергетичность означает совместные, кооперативные действия, дающие новый качественный эффект [6]. Интенсификация ХТП в обрабатываемой среде происходит за счет нелинейных физико-химических эффектов при синергетическом многофакторном воздействии. Само воздействие на обрабатываемую среду может быть линейным, прямым, но ускорение ХТП происходит за счет нелинейных эффектов 2-го порядка, например кавитации, турбулентности, фазовых переходов.

В качестве иллюстрации этого положения рассмотрим процесс растворения твердых частиц при течении потока жидкости в трубе. При увеличении перепада давления скорость ламинарного потока возрастает линейно, и скорость растворения частиц также возрастает по линейному закону. При достижении скорости потока гетерогенной жидкости некоторого критического значения происходит переход к турбулентному режиму течения, что резко ускоряет процесс растворения.

Аддитивные (суммарные) эффекты парных взаимодействий соответствуют процессам и явлениям, которые характерны для линейной теории термодинамики необратимых процессов. Синергетические и антагонистические эффекты выражают нелинейность процессов, протекающих в обрабатываемой среде при энергетическом воздействии, и для их описания необходимо базироваться на принципах нелинейной теории термодинамики необратимых процессов [6].

Энергетические воздействия предполагают не только парные комбинации, а также тройные и более. Прогнозируемыми являются аддитивные эффекты. Для синергетических и антагонистических эффектов, в силу их нелинейности, анализ и прогнозирование результатов воздействий является принципиально сложным, количество вариантов сочетаний синергетических и антагонистических эффектов велико.

Принцип концентрационной избирательности предполагает, что для интенсификации ХТП необходима концентрация энергетического воздействия на обрабатываемую среду в нужном месте и в нужное время. Так, например, для интенсификации процесса диспергирования необходимо приложение нагрузки (воздействия) в месте дислокации, дефекте структуры в момент, когда произошло достаточное накопление дефектов структуры частицы.

Наименьшие энергетические затраты при реализации энергетического воздействия будут при пульсационной (импульсной) форме реализации (принцип дискретности). Многие воздействия реализуются только в пульсационной форме. Практически все физико-химические процессы, которые традиционно считаются стационарными, при более детальном изучении имеют пульсационную составляющую на низком или высоком иерархическом системном уровне.

Такие процессы, как диспергирование и эмульгирование, осуществляются в результате единичных актов воздействия на частицы. Процессы растворения, экстракции, кристаллизации и многие другие реализуются за счет дискретного подвода или отвода определенной порции жидкости к поверхности фазового раздела. Чем чаще и быстрее будет происходить контакт новых фазовых поверхностей, тем интенсивнее будет идти процесс.

Основными принципами, на которых базируется методика интенсификации ХТП при импульсных энергетических воздействиях, являются:

- 1) принцип синергетичности;
- 2) принцип концентрационной избирательности;
- 3) принцип дискретности.

Интенсификация ХТП при энергетических воздействиях возможна за счет:

- 1) комбинирования и подбора нужного сочетания воздействий;
- 2) оптимизации и управления параметрами энергетических воздействий.

Общие принципы разработки пульсационных аппаратов для интенсификации ХТП, предложенные Р. Ш. Абиевым, основаны на следующих положениях [7]:

- 1) возбуждение колебаний на собственной частоте системы;
- 2) временные и пространственные масштабы воздействия на систему «аппарат–гетерогенная среда» должны быть согласованы с геометрическими, физическими и физико-химическими свойствами элементов на всех уровнях этой системы;
- 3) преобразование энергии, вводимой в аппарат от источника энергии, должно осуществляться предельно близко к той зоне, где она должна быть использована;
- 4) равномерность распределения воздействий по частицам дисперсионной среды;
- 5) дисперсная фаза должна подвергаться непрерывному или периодическому воздействию с целью диспергирования и поддержания в заданных пределах состава частиц;

б) создание управляемых течений, недопущение возникновения неконтролируемой турбулентности;

7) минимизация воздействия аппарата на окружающую среду.

Теоретическая база и практическое применение импульсных технологий для интенсификации ХТП описаны в литературе [1 – 22] и других работах.

## 1.2. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РОТОРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ АППАРАТАХ

РИА обычно используются в малотоннажном производстве с широким спектром номенклатуры производимого продукта и для решения исследовательских задач. В крупном промышленном производстве, а также, когда оправдано применение аппарата для проведения только одного технологического процесса, наиболее эффективным является использование специально спроектированного РИА для данного технологического процесса. Универсальные РИА проектируются таким образом, чтобы были задействованы и давали наибольшую отдачу основные факторы воздействия на жидкую гетерогенную обрабатываемую среду [8].

Схема классификации технологических процессов, реализуемых в РИА, приведена на рис. 1.1.

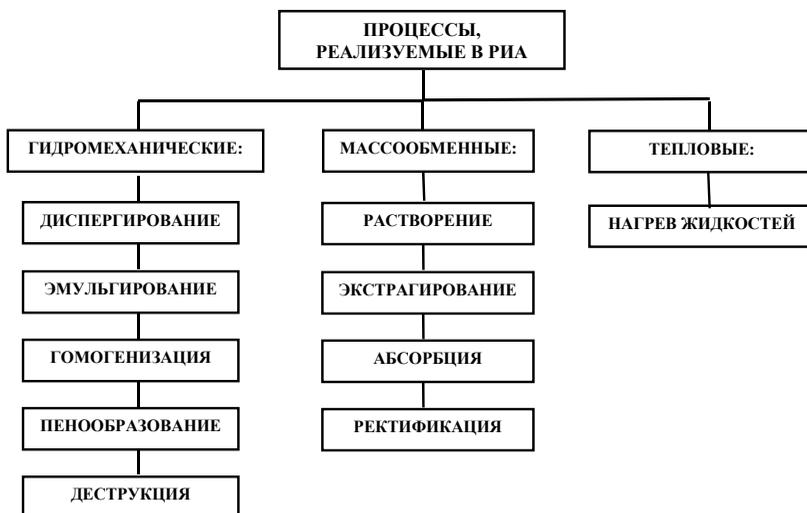
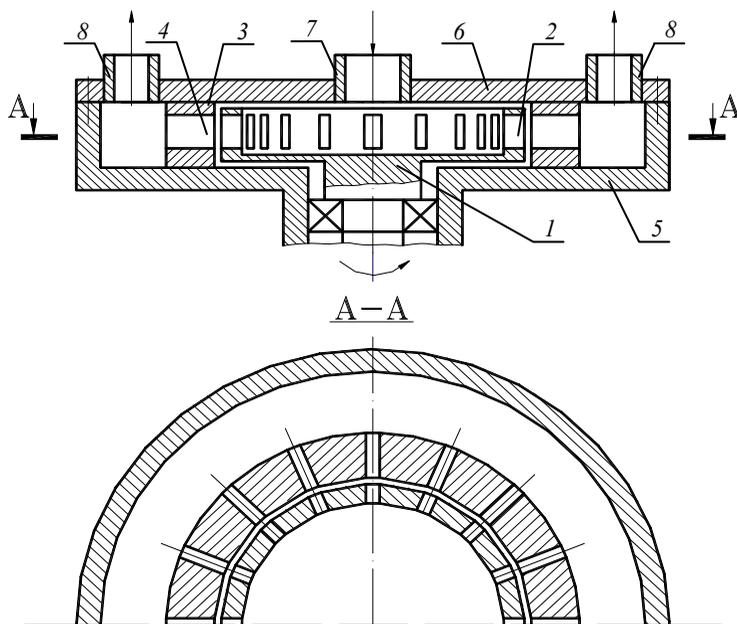


Рис. 1.1. Схема классификации технологических процессов, реализуемых в РИА

Применение РИА в технологиях и технологических линиях различного промышленного и опытно-промышленного назначения позволяет получать высококачественные продукты: химические, пищевые и биологически активные растворы, экстракты, эмульсии и суспензии. К таким продуктам относятся овощные и фруктовые соки, пюре, пасты, майонезы, гомогенизированное и восстановленное молоко, йогурты, мази, кремы, системы, содержащие биологически активные вещества, водотопливные эмульсии и суспензии; лакокрасочные материалы и т.п. В технологические комплексы кроме РИА входит стандартное оборудование для дозирования, нагнетания и подачи жидкостей и компонентов продукта, их нагрева и охлаждения, емкости предварительного смешивания и временного хранения компонентов.

Стандартная схема одноступенчатого РИА радиального типа показана на рис. 1.2. Принцип работы аппарата заключается в следующем. Обработываемая жидкость подается под давлением или самотеком через входной патрубок 7 в полость ротора 1, проходит через каналы ротора 2, каналы статора 4, рабочую камеру, образованную корпусом 5 и крышкой 6, и выходит из аппарата через выходной патрубок 8.



**Рис. 1.2. Схема роторного импульсного аппарата:**

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

При вращении ротора его каналы периодически совмещаются с каналами статора. Выходя из каналов статора, жидкость проходит рабочую камеру и выводится через выходной патрубок. 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. Скорость потока жидкости в канале статора является переменной величиной. При распространении в канале статора импульса избыточного давления вслед за ним возникает кратковременный импульс пониженного («отрицательного») давления, так как совмещение каналов ротора и статора завершилось, и подача жидкости в канал статора происходит только за счет «транзитного» течения из радиального зазора между ротором и статором. Объем жидкости, вошедший в канал статора, стремится к выходу из канала, и инерционные силы создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию. Кавитационные пузырьки растут при понижении давления до давления насыщенных паров обрабатываемой жидкости при данной температуре, и схлопываются или пульсируют при увеличении давления в канале статора. Часть кавитационных пузырьков выносятся в рабочую камеру.

Кавитацию, возникающую в канале статора РИА, нельзя назвать только акустической или только гидродинамической, так как имеют место оба метода генерирования кавитации. Акустическая кавитация возникает за счет распространения импульсов давления со скоростью звука в потоке жидкости, гидродинамическая кавитация возникает за счет понижения давления в потоке жидкости при полном совмещении канала ротора с каналом статора. Эти два эффекта взаимосвязаны друг с другом, так как поток жидкости является и генератором колебаний, и объектом озвучивания.

Кавитация представляет собой эффективное средство концентрации энергий низкой плотности звуковой волны и пульсирующего потока жидкости в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. В фазе разрежения акустической волны и локального понижения давления в потоке жидкости образуется разрыв в виде полости, которая заполняется насыщенным паром данной жидкости. В фазе сжатия под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения полость захлопывается, а пар конденсируется на границе раздела фаз. Через стенки полости в нее диффундирует растворенный в жидкости газ, который затем подвергается сильному адиабатическому сжатию. В момент схлопывания давление и температура газа достигают значительных вели-

чин (по расчетным данным до 100 МПа и 1000 °С) [9]. После схлопывания полости в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве.

В связи с тем, что скорость потока жидкости в канале статора велика и имеет флуктуации, поток имеет развитую турбулентность. При вращении ротора в зазоре между ротором и статором возникают большие сдвиговые напряжения. Рабочие поверхности ротора и статора воздействуют на жидкую гетерогенную среду за счет механического контакта, создавая большие срезывающие и сдвиговые усилия.

### 1.2.1. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И ГОМОГЕНИЗАЦИИ СУСПЕНЗИЙ

РИА применяли в процессе получения дисперсий антиоксидантов, используемых для стабилизации синтетических каучуков различного назначения, и дисперсий наполнителей каучуков [22]. По разработанной технологии получали дисперсии антиоксидантов неозона «Д», «ДФФД», ионола с различными биоразлагаемыми эмульгаторами. При этом производительность процесса возрастала почти в 3 раза, в 4–5 раз увеличивалось время расслаивания дисперсии по сравнению с ранее применяемой технологией. Прочность получаемых каучуков возрастает на 30...50%. РИА применялся для завершения роспуска волокнистых материалов и для расщепления пучков волокон при переработке грубых волокнистых материалов [23]. Применяемая технология позволяла увеличить процент использования макулатуры в получении картона, повысить его качество и снизить расход электроэнергии на размол с 95 кВт/ч на тонну для конической мельницы до 25 кВт/ч на тонну для РИА.

Диспергирование и гомогенизация исходной суспензии питательной среды РИА в производстве окситетрациклина позволяет увеличить выход целевого продукта и получить дисперсность частиц 15...20 мкм [24].

Применение РИА позволило уменьшить длительность производственного цикла и повысить качество выпускаемых мягких лекарственных форм суспензионного типа. Общие затраты времени снижаются в 6 – 10 раз, общие затраты энергии – в 3 – 5 раз [25, 26]. Время диспергирования зависит от прочности субстанций, концентрации субстанций и гранулометрического состава веществ [27]. Использование многофакторного воздействия позволяет получать устойчивые во времени аппреты с тонкодиспергированными в них нерастворимыми препаратами, например фурагина, даже в случае легко всплывающих или быстрооседающих наполнителей, введение которых в аппрет по традиционной технологии затруднительно или невозможно [28].

Цементно-водная суспензия, подвергнутая кавитационной обработке в РИА и добавленная в бетонную смесь, повышает прочность на сжатие и растяжение изделий из бетона [29, 30].

Насыщенная воздухом масса для пастилы после обработки в РИА, оказавшись при атмосферном давлении, значительно увеличивается в объеме за счет расширившихся пузырьков воздуха внутри массы [31].

Производство детергентов, используемых для составления композиций синтетических моющих средств, требует тонкого помола и высокой степени гомогенизации. Использование РИА обеспечивает существенное увеличение срока службы фильтра тонкой очистки и уменьшает вязкость детергентов [32, 33].

Перспективным направлением в энергетике является использование дисперсно-топливых систем. Использование качественных углемазутных суспензий позволяет уменьшить расход мазута на 20...25%. РИА служат эффективным устройством для получения угольно-масляных паст [34].

Диспергирование серы в РИА применялось для получения осерненного масла, характеризуемого большой маслянистостью, прозрачностью и отсутствием запаха серы [34].

Использование РИА в получении железооксидного пигмента позволяет обойтись без обжига шлама, а размол – заменить диспергированием в РИА [30, 35]. Технологии с многофакторной обработкой лакокрасочных эмульсий и суспензий в РИА давно и успешно применяются в промышленности [36].

Обработка растительного сырья в РИА позволяет осуществить дробление бобов сои до клеточного размера [37]. При обработке дисперсной липосомной системы образуются частицы со средним диаметром 700 нм, что на 20% меньше, чем в клапанных гомогенизаторах. Многоцикловая обработка обеспечивает эффективное воздействие на обрабатываемый материал за счет увеличения времени его пребывания в активных зонах, размер частиц уменьшается после каждого цикла [38].

Механотермическая обработка суспензий крахмала, вне зависимости от типа их дисперсионной среды, позволяет получать коллоидные растворы биополимера с меньшими значениями эффективной вязкости и напряжения сдвига. При использовании РИА процесс нагрева суспензии биополимера до 90 °С сопровождается его механоиницируемой деструкцией, которая приводит к уменьшению размеров макромолекул и, следовательно, их ассоциатов, формирующих надмолекулярную структуру коллоидного раствора крахмала. Малая структурированность и значительная степень дисперсности коллоидных рас-

творов крахмала крайне важны для получения нано- и биоконпозиционных материалов функционального назначения с высокой адгезионной и пленкообразующей способностью [39].

### 1.2.2. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ

Роторные импульсные аппараты широко применяются для создания высокодисперсных и устойчивых к расслоению эмульсий в различных отраслях промышленности.

Для интенсификации процесса выделения синтетических полимеров из растворов за счет эмульгирования раствора полимера, а также для приготовления дисперсий масла в производстве маслonaполненных каучуков применение РИА позволяет получить высокоустойчивую эмульсию [22].

В фармацевтике для проведения процессов экстракции [25] РИА используются при производстве лекарственных мазей (ихтиоловой, скипидарной, линимента аммиачного и т.п.) РИА позволил существенно сократить затраты ручного труда, повысить качество готового продукта (средний размер дисперсной фазы – 2,5 мкм) и сократить время приготовления мазей в 4 раза [40 – 44]. В парфюмерной промышленности РИА используются для получения ультратонких эмульсий кремов, различных экстрактов [42].

Эмульгирование жирных кислот (олеиновой и стеариновой) в присутствии полисахарида, способного образовывать полиэлектролитические комплексы на межфазных поверхностях, позволяет получать устойчивые дисперсии с размером частиц менее микрометра. Многофакторная обработка в РИА способствует не только эмульгированию, но и разрушению надмолекулярных образований в растворе хитозана, что способствует более плотному контакту макромолекул полимера с поверхностью капель гидрофобной жидкости [45].

Использование РИА для получения устойчивых и высокодисперсных эмульсий и паст, вводимых в бетон, позволило увеличить прочность бетона на 15...30% [42, 46, 47]; в дорожном строительстве – для приготовления водобитумных эмульсий высокой коллоидной устойчивости, обладающих хорошими технологическими свойствами [42, 48].

РИА применяются в энергетике, где использование водомазутных эмульсий на тепловых электростанциях и котельных позволяет получить существенный экономический эффект, основанный на повышении КПД на 3...5%, улучшить процесс горения мазута в паровых котлах, значительно снизить выбросы  $\text{NO}_x$  и бензо(а)пирена по сравнению с исходным мазутом, решить проблему с перевозкой и перекачкой топлива, избавившись от местных скоплений воды в высоковязких мазутах [49 – 58, 62].

В целлюлозной промышленности для интенсификации процесса получения раствора полиакриламида, используемого для повышения прочности бумаги и удержания наполнителей, применение РИА позволило сократить время приготовления раствора, увеличить показатель удержания коалина [22]. Приготовление эмульсий изоаминового спирта, конденсаторного масла, толуола, дизельного топлива, олеиновой кислоты, циклогексана в воде с помощью РИА позволило повысить качество эмульсий [59, 60].

Одними из важных звеньев технологии подземной добычи угля являются гидрофицированные механизированные комплексы, для эксплуатации которых применяются водомасляные эмульсии с жесткими характеристиками: высокой дисперсностью, стабильностью, отсутствием седиментации и коагуляции. При использовании РИА для приготовления рабочих жидкостей на шахтах России и Белоруссии сократился выход из строя многих узлов гидрооборудования, значительно сократились аварийные простои [30, 34, 63 – 73].

В пищевой промышленности РИА используются для гомогенизации и пастеризации молока. Кавитационное воздействие не только способствует повышению дисперсности эмульсии, но и уничтожает вредные микроорганизмы. При гомогенизации молока 90% жировых шариков имели размер до 2 мкм [74]. Дисперсность майонеза, получаемого с помощью РИА, в 2 раза ниже, чем с помощью клапанного гомогенизатора [43, 75 – 77].

Получены положительные результаты в производстве широкого ряда пищевых продуктов: водожировых эмульсий, не склонных к расслоению (майонезы, соусы, маргарины и т.п.), со стойкостью эмульсии 100%; творожных паст с равномерно распределенными кусочками внешних твердых компонентов – взбитых тонкодисперсных систем (муссы, сливки, десерты и т.п.) с получением плотности до  $0,5 \text{ г/см}^3$  [78].

В технологических процессах, предполагающих обработку твердых материалов, важным фактором, определяющим надежность, является использование качественной смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Применение РИА для получения СОЖ способствует повышению их качества, а также снижает энергозатраты в процессе их производства. Дисперсность СОЖ достигает  $0,8 \dots 1,2 \text{ мкм}$ , что увеличивает стойкость режущего инструмента в среднем на 30% и повышает чистоту обработки поверхности [30, 34, 42, 79 – 82].

### 1.2.3. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Перспективным направлением использования РИА является экстрагирование продуктов микробиологического синтеза, например каротина из биомассы. При циркуляционной обработке среды, проходящей

по замкнутому контуру из РИА в емкость и обратно, удалось достичь 100%-го выхода каротина после четырех циклов обработки [83].

Многие лекарственные вещества получают методами экстрагирования сырья растительного и животного происхождения. Применение РИА в процессе экстрагирования инсулина подкисленным спиртом из предварительно измельченной (до 3...5 мм) поджелудочной железы животных позволяет получить экстракты с высокой активностью в 3 раза быстрее [25].

Применение РИА интенсифицирует процесс экстрагирования танина (галлодубильной кислоты) из галловых орешков (патологические новообразования на листьях малоазиатского дуба). Степень извлечения возрастает с 49 до 77%, а время экстрагирования уменьшается с 3,0 до 0,5 ч [25].

Экстрагирование целевых компонентов из коры крушины в РИА увеличивает их выход на 20% и снижает трудоемкость операций за счет совмещения процессов измельчения и экстракции [25].

Аналогичный эффект достигается при использовании РИА в экстрагировании масла из плодов шиповника, облепихового масла из плодов облепихи, спиртовом экстрагировании календулы, валерианы, водного экстрагирования танина из листьев сумки, экстрагирования мицелиальных антибиотиков [25].

Обработка пектиносодержащего растительного сырья в РИА позволяет повысить выход конечного продукта, причем наибольший выход обеспечивается за счет обработки растительного сырья в аппарате при скорости вращения ротора 4500...5000 мин<sup>-1</sup> в течение 60 с при температуре 38...40 °С. Комплексная химическая и механоакустическая обработка растительного сырья в РИА интенсифицирует процессы гидролиза и экстракции пектиновых веществ и существенно сокращает время извлечения пектина, обеспечивая высокий выход, а также улучшает физико-химические характеристики продукта [84].

Одним из возможных и перспективных вариантов переработки древесной зелени ели европейской *Picea abies* (L.) Karst может явиться технология ее комплексной переработки, основанной на водно-щелочной обработке в роторно-пульсационном аппарате. В экстракт могут перейти водорастворимые группы соединений древесной зелени, группы соединений «средней полярности», представленные в основном фенольными соединениями, и группы малополярных соединений, образующие при обработке растворимые в водно-щелочном экстракте феноляты или соли кислот. Увеличение ширины прорезей ротора с 6 до 10 мм приводит к повышению эффективности процесса экстрагирования

ния. Об этом свидетельствует повышение выхода органических веществ в получаемых мицеллах, снижение выхода твердого остатка и повышение доли наименьших фракций твердого остатка [85].

Интенсификация процесса экстрагирования плодово-ягодного сырья в РИА за счет создания кавитации, интенсивных макро- и микротоков создает равномерное распределение экстрактивных веществ в жидкой фазе и способствует быстрому проникновению растворителя в нерастворимые части сырья. Тем самым понижается диффузионное сопротивление при экстрагировании и уменьшаются коэффициенты диффузии и массоотдачи [86].

Обработка растительного сырья в роторно-пульсационных аппаратах позволяет осуществить дробление бобов сои на наномасштабном уровне до клеточного размера и интенсифицировать массообменные процессы [37, 87].

Применение эффектов дискретно-импульсного ввода энергии, реализуемых в дисково-цилиндрических аппаратах роторно-пульсационного типа, позволило осуществить и интенсифицировать ряд тепломассообменных и физико-химических процессов получения гелеобразных фармацевтических систем, что привело к сокращению продолжительности в 2 раза производственного процесса получения спиртовых гелей. Полученный спиртосодержащий гель является вязкопластичной структурой с выраженными псевдопластичными реологическими свойствами, что свидетельствует о получении структурированной системы [88].

Интенсификация процесса растворения эвкалимина в этиловом спирте показала высокую эффективность РИА: время приготовления раствора уменьшается более чем на два порядка; уменьшаются потери спирта; снижаются энергетические затраты; снижается себестоимость производства ценного лекарственного препарата [89, 90].

Экспериментальные исследования [30, 91, 92] показали высокую эффективность применения РИА для проведения процессов абсорбции диоксида углерода в воде и диспергирования азота в воде.

За счет развитой кавитации, генерируемой в РИА, возможно проведение процесса разделения водно-спиртовой смеси на компоненты при нормальной температуре и давлении [93]. В процессе разделения воды и спирта изменяется их концентрация в жидкой и газовой фазах за счет молекулярной и конвективной диффузии через межфазную поверхность между гомогенной водно-спиртовой смесью и парогазовым пузырьком. Использование кавитации приводит к резкому увеличению межфазной поверхности за счет появления пульсирующих пузырьков, наполненных в основном парами спирта.

Гидроакустическое воздействие в РИА на обрабатываемую жидкую среду значительно способствует увеличению скорости реакции дегидрохлорирования по сравнению с механическим перемешиванием и ультразвуковой обработкой, а также позволяет интенсифицировать реакцию синтеза S-пропил-N-пентаметилентиокарбаната за счет более эффективного преобразования гидроакустической энергии в кавитационное воздействие [94, 95].

Экспериментальное исследование интенсификации процесса кислотного гидролиза крахмала с использованием РИА выявило значительное уменьшение затрачиваемого времени на получение концентрации редуцирующих групп в крахмале ( $1,25 \cdot 10^{-3}$  моль·л<sup>-1</sup>). При проведении реакции в обычных условиях такая же концентрация достигается за 150 мин, при ультразвуковой обработке – за 30 с, а при обработке в РИА – за 13 с.

По характеру структурных изменений, происходящих в крахмальных гелях при обработке в роторно-импульсном аппарате, гидрогели можно разделить на две группы. В гидрогелях первой группы (концентрация 3...5 мас. %) обработка в роторно-импульсном аппарате вызывает повышение поверхностного натяжения, снижение реакционной способности крахмала и ухудшение пленкообразующих свойств. В гидрогелях крахмала второй группы (5...8 мас. %) обработка вызывает снижение поверхностного натяжения, повышение реакционной способности крахмала и повышение физико-механических характеристик пленок [96, 97].

Кратковременные механические воздействия в роторно-пульсационном аппарате на водные растворы эфиров целлюлозы, а также их смеси способствуют перестройке структурной организации растворов и при этом не приводят к значительной деструкции макромолекул полимеров. Обработка смесей полисахаридов в условиях высокоскоростного сдвига позволяет получать композиты с регулируемыми реологическими свойствами [98, 99].

При обработке полимерных смесей в РИА за счет комплексного воздействия механических колебаний, кавитации и высоких сдвиговых напряжений происходит дорастворение хитозана, механическое расщепление микрогелевых частиц, а также разрушение набухших агломератов триацетата целлюлозы. Действие высоких сдвиговых нагрузок способствует ориентации освобожденных макромолекул обоих полимеров (хитозана и триацетата целлюлозы). Возрастает вероятность интермолекулярных контактов и возникновения надмолекулярных образований, включающих макромолекулы обоих полимеров (гетероагрегатов).

Механическая обработка в РИА растворов хитозана, не содержащих наполнитель (суспензию микрокристаллической целлюлозы), вызывает увеличение их разрывной нагрузки на 25...40%. Прочность наполненных пленок увеличивалась после механической активации формовочных суспензий в несколько раз. Механическая активация в РИА способствует более полному растворению хитозана в водных растворах уксусной кислоты. Использование гидроакустического воздействия позволяет сократить процесс растворения хитозанов от нескольких часов до 20...40 с. 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 [100 – 104].

Применение РИА для ускорения процесса растворения бензойной и салициловой кислот в воде способствует увеличению концентрации раствора этих кислот в воде по сравнению с традиционной технологией [105].

Для интенсификации процесса промывки шламов донных отложений от нефтепродуктов в качестве основного аппарата использовали двухступенчатый РИА, который позволяет достичь остаточного содержания масла в шламе менее 0,20% [106].

Выщелачивание триоксида вольфрама из шеелитового концентрата в РИА интенсифицирует процесс и позволяет уменьшить время достижения заданной концентрации в 2–3 раза [107].

#### 1.2.4. ДЕСТРУКЦИЯ ВЕЩЕСТВА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ КАВИТАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Существуют гипотезы и экспериментальные данные, свидетельствующие, что кавитация способна инициировать ядерные реакции и способствовать деструкции материи. В момент схлопывания кавитационного пузырька давление и температура газа внутри него достигают значительных величин.

Механизм получения тепловой энергии за счет кавитации основан на ее вторичных нелинейных эффектах в жидкости [108]. В работе [109] сделана оценка эффективности нагрева жидкости за счет кавитационных эффектов.

Для оценки эффективности работы такой системы коэффициент теплопроизводительности можно рассчитать по формуле

$$K = \frac{(E_c - E_0)\varphi}{E_0} = \frac{[r(P - 2P_{II}) - 3\sigma]\varphi}{2rP_{II} + 3\sigma}.$$

Массовую концентрацию кавитационных пузырьков, образующих кавитационное облако, можно определить как отношение объема кавитационного облака к объему кавитационного пузырька при максимальном расширении:

$$\varphi = \frac{3v_k}{4\pi r_{\max}^3}.$$

Энергия, затрачиваемая на образование кавитационного пузырька, заполненного паром, определяется как

$$E_0 = 4\pi r^2 \sigma + \frac{4}{3} \pi r^3 (P_0 + P_{\text{п}}).$$

В первом приближении принимается  $P_0 = P_{\text{п}}$ .

Энергия сжатия кавитационного пузырька определяется по формуле

$$E_c = \frac{4}{3} \pi P (r_{\max}^3 - r_{\min}^3) \approx \frac{4}{3} \pi P r_{\max}^3.$$

При образовании в воде пузырька радиусом 1 мм при температуре  $t = 10^\circ\text{C}$ , давлении насыщенного пара  $P_{\text{п}} = 1,25 \cdot 10^3$  Па, поверхностном натяжении  $\sigma = 7,28 \cdot 10^{-4}$  Н/м энергия образования пузырька равна  $E_0 = 1,995 \cdot 10^{-5}$  Дж. Энергия сжатия пузырька жидкостью, находящейся при атмосферном давлении  $P = 10^5$  Па, равна  $E_c = 4,189 \cdot 10^{-4}$  Дж. Таким образом, энергия сжатия пузырька более чем в 20 раз превышает энергию его образования [109].

Здесь  $E_0$  – энергия образования кавитационного пузырька;  $E_c$  – энергия сжатия кавитационного пузырька;  $K$  – коэффициент теплопроизводительности;  $P$  – давление в жидкости, при котором происходит схлопывание пузырька;  $P_{\text{п}}$  – давление насыщенного пара при данной температуре;  $r$  – радиус пузырька;  $r_{\max}$  – радиус пузырька при максимальном расширении;  $r_{\min}$  – радиус пузырька при полном сжатии;  $v_k$  – объем кавитационного облака;  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $\varphi$  – концентрация кавитационных пузырьков в жидкости.

В таблице 1.1 приведены значения отношения энергии сжатия к энергии образования кавитационного пузырька при различных значениях давления в жидкости и давления насыщенного пара в кавитационном пузырьке.

**1.1. Значение отношения энергии сжатия  
к энергии образования кавитационного пузырька  
при различных значениях давления в жидкости  
и давления насыщенного пара в кавитационном пузырьке**

	$P \cdot 10^5, \text{ Па}$					$P_{\text{п}} \cdot 10^5, \text{ Па}$				
	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	0,0238	0,0752	0,2031	0,4830	0,7150
						$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$
$\frac{E_c}{E_0}$	2,1	10,5	20,9	31,5	41,9	20,99	6,65	2,46	1,04	0,69

На основании этих данных можно сделать вывод, что энергия сжатия кавитационного пузырька увеличивается линейно в зависимости от давления в окружающей жидкости. При увеличении давления в жидкости величина отношения энергии сжатия к энергии образования кавитационного пузырька увеличивается. При увеличении температуры воды и, соответственно, давления насыщенного пара отношение энергии сжатия и энергии образования кавитационных пузырьков уменьшается.

Отсюда делается вывод, что если гидравлическая система, в которой работает теплогенератор, открыта по давлению, то сжатие пузырька происходит под давлением окружающей жидкости, т.е. происходит приток энергии к жидкости из окружающей среды [109].

Группа ученых под руководством Талейархана зафиксировала в лабораторных условиях холодную термоядерную реакцию в одиночном газовом пузыре [110, 111]. В экспериментах использовали мензурку с жидким ацетоном, в котором атомы водорода были заменены атомами дейтерия ( $\text{C}_3\text{D}_6\text{O}$ ). Через жидкость интенсивно пропускались звуковые волны, генерируя акустическую кавитацию. Кавитация инициировала интенсивную сонолюминесценцию.

Кавитационные пузырьки возникали на пути прохождения быстрых нейтронов (14,3 МэВ), а затем разрастались до достаточно больших размеров и схлопывались с акустическим сигналом частотой 19,3 кГц. Во время кавитации в жидкости появлялись маленькие пузыри, которые увеличивались до 2 мм в диаметре и взрывались. Взрывы сопровождалась вспышками света и выделением энергии

(температура взрыва достигала 10 миллионов градусов по Кельвину). Аналогичные результаты были получены также другими исследователями [112].

Анализ возможности ядерных превращений в кавитационных пузырьках сделан в работе [113]. Отмечается, что для достижения максимальной вероятности инициирования ядерных реакций в газовых пузырьках необходимо использовать жидкости с малым давлением насыщенных паров и обеспечить сферически симметричное сжатие со степенью сжатия порядка 100.

Сонолюминесценция и звуковые химические реакции являются генетически связанными процессами, могут оказывать взаимное влияние, но в принципе они могут осуществляться независимо один от другого. Ультразвуковая люминесценция и свечение, возникающие при гидродинамической кавитации, являются близкими по своей природе процессами. При экспериментальном исследовании кавитации в низкочастотных звуковых полях была выявлена аналогия по физико-химическим эффектам между низкочастотной и ультразвуковой кавитациями [114, 115].

Модель физико-химических процессов, происходящих в кавитационном пузырьке и прилегающем к нему объеме жидкости, представляют в следующем виде [114]. В кавитационную полость могут проникать пары воды, растворенные газы, а также вещества с высокой упругостью пара и не могут проникать ионы или молекулы нелетучих растворенных веществ. Выделяющейся в процессе схлопывания пузырька энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной полости. На этой стадии любой из присутствующих газов является активным компонентом, участвуя в передаче энергии возбуждения, перезарядке и других процессах. Действие звукового поля на вещества, проникающие в полость, является непосредственным, прямым, причем действие активных газов  $O_2$ ,  $H_2$  и  $N_2$  – в кавитационной полости двойственное [114, 115]:

1) во-первых,  $O_2$  и  $H_2$  участвуют в реакциях трансформирования радикалов:



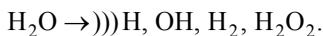
а  $N_2$  – в газовых звукохимических реакциях, конечным результатом которых является фиксация азота:



2) во-вторых, химически активные газы, проникая в кавитационную полость, участвуют так же, как и благородные газы, в передаче энергии электронного возбуждения молекулам воды и в процессе перезарядки. Здесь символом ))) обозначено химическое действие звука.

При схлопывании кавитационного пузырька в раствор переходят радикалы Н, ОН, ионы и электроны малой энергии, образовавшиеся в газовой фазе при расщеплении молекулы Н<sub>2</sub>О и веществ с высокой упругостью пара, продукты их взаимодействия и частичных рекомбинаций, а также метастабильные возбужденные молекулы Н<sub>2</sub>О [114].

Суммарную схему кавитационного расщепления молекул воды представляют в следующем виде:



Эти возникающие в системе активные частицы после перехода в раствор сольватируются и реагируют с растворенными веществами. На этой стадии, когда осуществляются косвенные действия акустических колебаний, на ход процесса могут оказывать влияние практически только химически активные газы – О<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>.

В конечном счете воздействие кавитации на водные растворы сводится к процессу расщепления молекул воды в кавитационных пузырьках. Независимо от природы растворенных веществ, звук действует на одно вещество – на воду, что приводит к изменению ее физико-химических свойств: увеличению рН, электропроводности воды, увеличению числа свободных ионов и активных радикалов, структуризации и активации молекул [114 – 118].

В процессах, в которых начинают проявляться необычные ядерные эффекты, нижняя граница амплитуды колебаний начинается примерно от 1700 кПа [119]. Наиболее важные процессы для получения ядерных эффектов происходят во время полупериода сжатия кавитационного пузырька. Под действием внешнего давления кавитационные пузырьки начинают сжиматься. Сферическая граница пузырька с нарастающим ускорением устремляется к центру и сжимает парогазовую смесь, находящуюся в пузырьке. При обычных параметрах давление в пузырьке достигает величины порядка 10 000 атм и температура до 10 000 °С [119].

С повышением давления в звуковой волне увеличивается скорость движения стенки пузырька. По гипотезе А. Ф. Кладова [119], эффект начинает проявляться после того, как стенка пузырька начнет двигаться со скоростью, большей, чем скорость распространения звука в среде внутри пузырька, т.е. после преодоления звукового барьера.

При этом дальнейшее сжатие и разогрев смеси в пузырьке прекращается и начинается обратный процесс снижения давления и температуры за счет конденсации нагретого вещества на поверхности жидкости. В пристеночном слое жидкости при этом повышается плотность жидкости до величины порядка ядерной плотности за счет инерционных сил, так как стенка движется с возрастающим ускорением, и дополнительного уплотнения от процесса конденсации. Некоторые ядерные реакции начинают протекать уже в этом уплотненном слое кавитационного пузырька (так называемые пикноядерные реакции).

На основе теоретического и экспериментального обоснования предложен способ получения энергии [119], заключающийся в подаче вещества в жидкой фазе в зону кавитационной обработки и создании кавитационных пузырьков путем периодически изменяющегося давления.

В настоящее время особое внимание многие исследователи уделяют методам интенсивной обработки нефти и нефтепродуктов с целью увеличения выхода светлых фракций при перегонке, снижения содержания серы и улучшения других характеристик нефти. Для решения этой задачи применяются различные энергетические воздействия в импульсной (пульсационной) форме: механические, гидродинамические, электрические, магнитные [119 – 130].

Выводы по эффективности конкретного импульсного энергетического воздействия на нефть и нефтепродукты неоднозначные, например, имеются серьезные и аргументированные исследования, показывающие низкую эффективность кавитационного воздействия на органические соединения [131, 132]. Но существует также много информации о положительном и эффективном физическом воздействии на нефть и нефтепродукты с целью увеличения выхода светлых фракций при перегонке нефти и улучшения их характеристик, например снижения вязкости и содержания серы [120 – 130].

Энергетическое воздействие на нефть и нефтепродукты позволяет увеличить выход легколетучих фракций при ее перегонке. Применяя импульсное энергетическое воздействие из тяжелой нефти, можно получить 20...30% бензина, 40...50% дизельного топлива, 20...30% мазута, битума и других тяжелых товарных продуктов. В процессе импульсной кавитационной обработки нефти и нефтепродуктов энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, используется для разрыва химических связей между атомами больших молекул углеводородных соединений [120 – 130].

Применение кавитационно-акустического воздействия позволяет подавить процессы коксообразования и интенсифицировать процессы деструкции за счет воздействия на микрогидродинамику жидких реак-

ционных сред. В качестве генератора кавитации используются кавитационно-акустические насосы с регулируемой энергетикой кавитационного воздействия. Использование этого технологического приема позволило значительно снизить температуру крекинга – до 410 °С и ниже, избежать нежелательного закоксовывания оборудования, а также снизить давление с 2,5 до 0,5...0,2 МПа и вдвое уменьшить металлоемкость оборудования [121].

Для разрыва связей в молекулах углеводородных соединений необходимо обеспечить на сложную многокомпонентную систему, которой является нефть и нефтепродукты, многофакторное энергетическое воздействие в импульсной форме. Такое воздействие реализуется в РИА [42, 128, 133]. При кавитационной обработке углеводородного сырья происходит деструкция молекул, вызванная микрокрекингом молекул и процессами ионизации. В результате протекания этих процессов в системе накапливаются «активированные» частицы: радикалы, ионы, ионно-радикальные образования [125].

Экспериментальные исследования по импульсной многофакторной энергетической обработке нефти (тип «легкая») показали, что многократно обработанная в РИА нефть начинает перегоняться под атмосферным давлением при температуре ниже на 10 °С, чем необработанная нефть, 50% обработанной нефти перегоняется при температуре до 265 °С. Многофакторное импульсное энергетическое воздействие на мазуты позволяет снизить вязкость на 20...30%, увеличить температуру вспышки на 5...10%, снизить содержание серы в 1,5 раза [134].

По данным авторов монографии [42], после однократной обработки нефти в роторно-пульсационном акустическом аппарате (РПАА) в интервале температур от НК до 200 °С – выход светлых фракций по сравнению с базовым образцом (необработанная нефть) увеличивается в 4,5 раза, вязкость нефти снижается в среднем в 1,5 раза. Такое увеличение выхода светлых фракций, по мнению авторов [42], можно объяснить тем, что акустическое излучение достаточно большой интенсивности разрушает дисперсную структуру нефтяного сырья. Чем тяжелее это сырье, больше его вязкость, меньше в нем содержания легких фракций, тем более эффективен РПАА. При обработке мазута в РПАА его вязкость снизилась в 2 раза, температура вспышки – в 1,5 раза, температура застывания – в 2,5 раза, выход светлых фракций увеличился в 1,8 раза.

Лабораторные исследования по обезвоживанию нефти на РПАА периодического действия показали, что использование РПАА позволяет сократить количество вводимого реагента (деэмульгатора) в 1,5 – 3 раза по сравнению с обычными нормами введения его в эмульсию (без

использования РПАА), использование РПАА позволяет проводить в некоторых случаях обезвоживание нефти без применения реагента. Использование РПАА для процессов обессоливания и обезвоживания нефти дает положительный результат, увеличивая интенсивность и глубину проведения этих процессов в 2 – 2,5 раза [42].

Несомненно, что для создания научной базы для применения импульсных энергетических воздействий в нефтеперегонке и нефтехимии необходимы четкое понимание механизма каждого из видов воздействий и обоснование эффективности такого воздействия. Для промышленности важны конечный результат и экономическая эффективность. Критики кавитационных импульсных технологий признают, что при импульсной обработке органических соединений происходит интенсификация тепломассообмена и возникают существенные тепловые и другие физико-химические эффекты [132]. Импульсное многофакторное воздействие на нефть и нефтепродукты является синергетическим и инициирует физико-химические эффекты на новом качественном уровне.

При кавитационной обработке углеводородных жидкостей (гексана, этанола, бензола и др.) получают нано- и микроразмерные алмазы и кристаллические углеродные образования [135 – 137]. Наноалмазы могут быть использованы для создания нанокomпозиционных материалов, элементов нанoeлектроники, селективных адсорбентов и катализаторов, объектов медико-биологического использования. Применение наноалмазов улучшает качество микроабразивных и полировальных составов, смазочных масел, абразивных инструментов, полимерных композиций, резин и каучуков, систем магнитной записи, позволяет выращивать алмазные пленки на различных подложках.

Кавитационные технологии позволяют получить наноструктурную основу для приготовления медицинских, косметических, фармакологических, ветеринарных, стоматологических и других препаратов, например белковые нано- и микросферы, кремнийорганические однослойные микрокапсулы, содержащие лекарственные (например, антибиотики) и биологические активные вещества, обладающие агрегативной устойчивостью.

С применением кавитационных технологий получают высокопористые наноразмерные кластеры аморфных металлов, солей металлов, коллоидные ферромагнитные материалы (магнитные жидкости). Наноразмерные коллоидные растворы металлов и их солей находят применение как катализаторы, материалы для информационных носи-

телей, полупроводники и т.д. Для создания аморфных продуктов на основе металлов по традиционным технологиям в смесь добавляются стеклообразующие материалы. С применением кавитационных технологий для синтеза аморфных оксидов металлов (или сульфидов и других солей металлов) не требуется добавлять стеклообразователи и аморфные продукты получают наноразмерными. Кавитационные технологии используются для введения аморфных наноразмерных катализаторов в мезопоры и осаждения наночастиц (металлы, оксиды металлов, полупроводники) на керамических и полимерных поверхностях. Наночастицы осаждаются равномерным слоем на внутренних стенках мезопор без их закупоривания, прикрепляются к поверхности посредством формирования химических взаимодействий с подложкой и не могут быть удалены промывкой [138 – 155].

Перспективными направлениями применения кавитационных технологий при получении и обработке нанопродуктов могут быть следующие процессы:

- импульсная энергетическая обработка микрообъемов с нанопродуктами;
- наноразмерные эффекты в микрообъемах;
- микропотоки для транспорта нанобъектов, микротеплонасосы и микромиксеры специальных назначений;
- упаковка в нано- и микрообъекты активных веществ;
- стерилизация микрообъемов жидкостей;
- разрыв длинных углеводородных молекул и их преобразование в новое структурное состояние;
- получение и гомогенизация нано- и микроразмерных суспензий и эмульсий;
- интенсификация теплообменных процессов и химических реакций в нано- и микрообъемах.

При кавитационном воздействии на воду разрушаются коллоиды и частицы, внутри которых могут содержаться бактерии, микроорганизмы лишаются защиты перед другими химическими и физическими воздействиями кавитации. Бактерицидное действие кавитации прямо пропорционально ее интенсивности, кратности или времени обработки. Кавитация способна дробить крупные молекулы органики, являющиеся центрами образования кавитационных пузырьков точно так же, как и микробы являются центрами притяжения кавитационных образований. По размеру микробы соизмеримы с крупными молекулами органики, особенно с молекулами тяжелых нефтепродуктов [156].

Воздействие кумулятивных струй жидкости, локальные пульсации давления и температуры при схлопывании кавитационных пузырьков способны вызывать гибель бактерий, что используется при обеззараживании жидких продуктов и растворов [157 – 168]. При интенсивном воздействии ударных волн в водных растворах было показано уменьшение численности в тысячи раз санитарно значимых представителей семейства *Enterobacteriaceae* – грамотрицательных бактерий *Echerichia coli* и *Salmonella* sp.

Эффективность биологической очистки сточных вод повышается за счет использования в качестве активного ила на стадии аэрации вспухшего ила, работоспособность которого обеспечивается кавитационной обработкой подаваемой сточной воды в кавитационном аппарате, циркулирующей в процессе сорбции и окисления смеси сточной воды и активного ила. При перекачке возвратного вспухшего ила на регенерацию и во время регенерации подают атмосферный воздух и производят диспергирование иловоздушной смеси и ее насыщение растворенным кислородом.

Импульсное многофакторное воздействие на сточную воду и иловые отложения позволяет искусственно культивировать вспухший ил, так как кавитационная обработка способствует переходу микрофлоры активного ила в палочковую (нитчатую) форму, а также позволяет поддерживать окислительную и сорбционную его способность на наиболее высоком уровне. При кавитационной обработке образуется вспухший ил и подавляется рост иных видов микроорганизмов, обладающих значительно более низкой способностью объемного сорбирования, происходит процесс разрушения флокул и переход задержанного ила в первоначальное хлопьевидное состояние, что позволяет производить процесс регенерации без регенераторов и удешевить процесс очистки [169, 170].

Кавитационная обработка позволяет регенерировать смазочно-охлаждающие жидкости, предназначенные для утилизации. Кавитационная обработка улучшает не только биологическую стабильность эксплуатируемой эмульсии, но и позволяет улучшить ее технологические свойства [8, 171].

Нами проведены исследования по кавитационной обработке в роторном импульсном аппарате сточной воды, которые показали, что количество общих колиформных бактерий (ОКБ) уменьшилось почти в 100 тысяч раз, количество термотолерантных бактерий (ТКБ) – в 60 тысяч раз, количество колифагов (бактериальных вирусов) – более чем в 80 раз (табл. 1.2).

## 1.2. Результаты кавитационной обработки сточной воды

Анализируемые показатели	Единицы измерения	Метод проведения анализа	Содержание в сточной воде	
			до обработки	после обработки
Общие колиформные бактерии – ОКБ (интегральный показатель фекального загрязнения)	КОЕ/100 мл	Метод мембраной фильтрации	$9 \cdot 10^4$	Не обнаружены
Термотолерантные колиформные бактерии – ТКБ (подтверждение фекального загрязнения)	КОЕ/100 мл	Метод мембраной фильтрации	$6 \cdot 10^4$	Не обнаружены
Колифаги (бактериальные вирусы)	БОЕ/100 мл	Титрационный метод	86	Не обнаружены

Одной из проблем при производстве жидких органических удобрений из торфа и сапропеля является присутствие в растворе готовой продукции живых клеток бактерий и спор грибов, свободноплавающих и иммобилизованных на остатках частиц исходного материала. Некоторые виды грибов могут проявлять фитопатогенные свойства. При длительном хранении органических удобрений такие микроорганизмы способны активно расти и размножаться. Их развитие и накопление продуктов жизнедеятельности могут приводить к снижению качества готовой продукции [172].

После кавитационной обработки жидких органических удобрений в роторных импульсных аппаратах (РИА) выявлено снижение численности бактерий в 2 – 10 раз. Импульсная многофакторная обработка приводила и к снижению численности грибных спор, особенно малого размера (диаметром менее 3 мкм), но почти не влияла на численность более крупных спор и содержание грибного мицелия, что указывает на преобладание кавитационного фактора воздействия на споры и грибные мицелии.

Результат импульсной многофакторной обработки в РИА – это снижение в 2 раза численности способных к росту колониеобразующих единиц – спор и фрагментов мицелия – культивируемых микроскопических грибов. Видовое разнообразие грибов после обработки сохранялось, существенного изменения таксономического состава содержащихся в образцах микромицетов не отмечено. В то же время после импульсной многофакторной обработки установлено снижение уровня присутствия ряда видов, в том числе доминирующих грибных комплексов [172, 173].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1

1. **Кардашев, Г. А.** Физические методы интенсификации процессов химической технологии / **Г. А. Кардашев.** – М. : Химия, 1990. – 208 с.
2. **Промтов, М. А.** Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества : учебное пособие / М. А. Промтов. – М. : Изд-во Машиностроение-1, 2004. – 136 с.
3. **Задорский, В. М.** Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода / В. М. Задорский. – К. : Техника, 1989. – 208 с.
4. **Дискретно-импульсный** ввод энергии в теплотехнологиях / А. А. Долинский, Б. И. Басок, С. И. Гулый и др. – К. : ИТТФ НАНУ, 1996. – 206 с.
5. **Белоглазов, И. Н.** Интенсификация и повышение интенсивности химико-технологических процессов / И. Н. Белоглазов, А. И. Муравьев. – Л. : Химия, 1988. – 206 с.
6. **Хакен, Г.** Синергетика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1980. – 404 с.
7. **Абиев, Р. Ш.** Пульсационные аппараты нового поколения – энерго- и ресурсосберегающее оборудование химических производств / Р. Ш. Абиев // Химическая промышленность сегодня. – 2008. – № 4. – С. 46 – 54.
8. **Промтов, М. А.** Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика : монография / М. А. Промтов. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 260 с.
9. **Кнэпп, Р.** Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М. : Мир, 1974. – 668 с.
10. **Ганиев, Р. Ф.** Волновые машины и технологии (введение в волновую технологию) / Р. Ф. Ганиев. – М. : Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 192 с.

11. **Новицкий, Б. Г.** Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Б. Г. Новицкий. – М. : Химия, 1983. – 192 с.
12. **Федоткин, И. М.** Интенсификация технологических процессов пищевых производств / И. М. Федоткин, Б. Н. Жарик, Б. И. Погорельский. – К. : Техника, 1984. – 176 с.
13. **Карпачева, С. М.** Пульсационная аппаратура в химической технологии / С. М. Карпачева, Б. Е. Рябчиков. – М. : Химия, 1983. – 224 с.
14. **Основы физики и техники ультразвука** : учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат, М. М. Дубровин, Н. Н. Хавский и др. – М. : Высшая школа, 1987. – 352 с.
15. **Промтов, М. А.** Анализ методов интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2000. – Т. 43, № 4. – С. 138 – 142.
16. **Промтов, М. А.** Анализ критериев оценки интенсивности химико-технологических процессов и эффективности химико-технологической аппаратуры / М. А. Промтов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1998. – Т. 4, № 4. – С. 516 – 521.
17. **Промтов, М. А.** Анализ условий и разработка методики интенсификации химико-технологических процессов в гетерогенных жидкостях при энергетических воздействиях / М. А. Промтов, В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2001. – Т. 7, № 3. – С. 407 – 421.
18. **Промтов, М. А.** Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 861 – 869.
19. **Юдаев, В. Ф.** Эффективность импульсного воздействия на интенсификацию технологических процессов / В. Ф. Юдаев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2009. – № 4. – С. 39 – 41.
20. **Ультразвуковые** многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В. Н. Хмелев, Г. В. Леонов, Р. В. Барсуков, и др. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.
21. **Hao Feng.** Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing / Under edition Hao Feng, Gustavo V. Barbosa-Cánovas, Jochen Weiss // Springer Science+Business Media, LLC. 2011. – 678 p.

22. **Богданов, В. В.** Эффективные малообъемные смесители / В. В. Богданов, Б. И. Христофоров, Б. А. Клоцунг. – Л. : Химия, 1989. – 224 с.
23. **Бугай, А. С.** Ультразвук в целлюлозно-бумажной промышленности / А. С. Бугай. – Пермское изд-во, 1969. – 66 с.
24. **Скиба В. В.** Гидроизлучатели роторно-пульсационного типа в процессах биотехнологии / В. В. Скиба, М. А. Балабудкин, В. Г. Щебатин // Динамические эффекты мощного ультразвука : сб. науч. тр. – Ижевск, 1988. – Вып. 3. – С. 68 – 71.
25. **Балабудкин, М. А.** Роторно-пульсационные аппараты в микро-фармацевтической промышленности / М. А. Балабудкин. – М. : Медицина, 1983. – 160 с.
26. **Интенсификация** получения суспензионных питательных средств в производстве антибиотиков / Б. В. Андоев, М. А. Балабудкин, В. И. Банькин и др. // Разработка теории и конструктивного оформления машин и аппаратов интенсивного действия и с участием зернистых материалов : межвуз. сб. науч. тр. – Иваново : ИХТИ, 1986. – С. 26 – 29.
27. **Исследование** процесса диспергирования системы «твердое тело – жидкость» в теплообменных технологиях / Л. Н. Грабов и др. // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, вып. 4. – С. 60 – 64.
28. **Корнилова, Н. А.** Использование механической активации аппаратов при получении текстильных материалов с пролонгированным лечебным действием / Н. А. Корнилова, И. А. Липатова // Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, вып. 4. – С. 90 – 94.
29. **Эффект** предварительного активирования добавок в транспортном строительстве / Б. А. Усов, А. А. Дюпеев, Е. А. Усов, А. А. Кальчин // Бетон и железобетон. – 1989. – № 4. – С. 15 – 17.
30. **Балабышко, А. М.** Гидромеханическое диспергирование / А. М. Балабышко, А. И. Зимин, В. П. Ружицкий. – М. : Наука, 1998. – 331 с.
31. **Маршалкин, Г. А.** Технологическое оборудование кондитерских фабрик / Г. А. Маршалкин. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 448 с.
32. **Зимин, А. И.** Обоснование параметров и разработка оборудования для технологической линии производства детергентов / А. И. Зимин // Полимерные материалы: производство и экология : тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Ярославль, 1995. – С. 50–51.
33. **Зимин, А. И.** Интенсификация и оптимизация технологического процесса производства детергентов / А. И. Зимин // Полимерные

материалы: производство и экология : тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Ярославль, 1995. – С. 48–49.

34. **Балабышко, А. М.** Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности / А. М. Балабышко, В. Ф. Юдаев. – М. : Недра, 1992. – 176 с.

35. **Зимин, А. И.** Технология переработки нейтрализованных серно-кислых шламов в железоксидный пигмент / А. И. Зимин // Пути и средства повышения экологической безопасности гальванических производств : тез. докл. 4-й Всерос. науч.-техн. семинара. – Ярославль, 1995. – С. 7 – 39.

36. **Бодня, М. Д.** Непрерывный процесс диспергирования пигментов при производстве эмалей путем озвучивания излучателями сиренного типа / М. Д. Бодня // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1969 – № 1. – С. 24 – 26.

37. **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.

38. **Авдеева, Л. Ю.** Метод інтенсифікації процесу отримання ліпосомних наноструктур при дискретно-імпульсному введенні енергії. / Л. Ю. Авдеева // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, вып. 3. – С. 87 – 91.

39. **Роторно-пульсационное** устройство для интенсификации процесса получения жидкофазных материалов на основе крахмала / В. А. Падохин, Н. Е. Кочкина, Т. В. Федосеева и др. // Пищевая промышленность. – 2010. – Вып. 1. – С. 38 – 40.

40. **Зимин, А. И.** Интенсификация приготовления дисперсных сред в роторно-импульсных аппаратах в химико-фармацевтической промышленности / А. И. Зимин // Химико-фармацевтический журнал – 1997. – № 8. – С. 50 – 53.

41. **Ледова, Т. М.** Закономерности приготовления эмульсионных систем в роторно-пульсационном аппарате / Т. М. Ледова, М. А. Балабудкин, С. А. Плюшкин // Химико-фармацевтический журнал. – 1980. – Т. 14, № 5. – С. 96 – 99.

42. **Роторно-пульсационные** акустические аппараты / В. М. Фомин, А. А. Корноухов, В. Н. Понькин и др. – Казань : Изд-во «Отечество», 2010. – 136 с.

43. **Фиалкова, Е. А.** Гомогенизация. Новый взгляд : монография-справочник / Е. А. Фиалкова. – СПб. : ГИОРД, 2006. – 392 с.

44. **Промтов, М. А.** Экспериментальные исследования процесса эмульгирования лекарственных форм в роторно-импульсном аппарате /

М. А. Промтов, А. И. Зимин // Химико-фармацевтический журнал. – 2000. – Т. 34, № 10. – С. 38–39.

45. **Макарова, Л. И.** Гидроакустическое диспергирование жирных кислот в растворах хитозана / Л. И. Макарова, Е. А. Мезина, М. М. Липатова // Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53, вып. 10. – С. 59 – 62.

46. **Эффект** предварительного активирования добавок в транспортном строительстве / Б. А. Усов, А. А. Допокеев, Е. А. Усов, А. А. Кальчин // Бетон и железобетон. – 1989, № 4. – С. 15 – 17.

47. **Попов, О. Р.** Высокоэффективный способ приготовления парафиновой пасты, полифункциональной добавки для бетонов / О. Р. Попов, Р. И. Попов, П. Н. Курочка, М. А. Промтов // Транспортное строительство. – 1994. – № 1. – С. 36–37.

48. **Будник, В. А.** Механический способ эмульгирования битума в воде. Установка. Методика. Результаты апробирования / В. А. Будник, Н. Г. Евдокимова, Б. С. Жирнов // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. – 2006. – Вып. 1. – URL : [http://www.ogbus.ru/authors/Budnik/Budnik\\_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Budnik/Budnik_2.pdf).

49. **Волков, А. Н.** Сжигание газов и жидкого топлива в котлах малой мощности / А. Н. Волков. – Л. : Недра, 1989. – 160 с.

50. **Павлов, Б. П.** Подготовка водомазутных эмульсий для сжигания в топочных устройствах. В кн. : Повышение эффективности использования газообразного и жидкого топлива в печах и отопительных котлах / Б. П. Павлов, С. И. Батуев, К. В. Щевелев. – Л. : Недра, 1983 – 216 с.

51. **Селиверстов, В. М.** Экономия топлива на речном флоте / В. М. Селиверстов, М. И. Браславский. – М. : Транспорт, 1983. – 231 с.

52. **Зубрилов, С. П.** Ультразвуковая кавитационная обработка топлива на судах / С. П. Зубрилов, В. М. Селиверстов, М. И. Браславский. – Л. : Судостроение, 1988. – 80 с.

53. **Зимин, А. И.** Влияние состава топливных эмульсий на концентрацию оксидов азота и серы в выбросах промышленных котельных / А. И. Зимин // Экологическая защита городов : тез. докл. науч.-техн. конф. – М., 1996. – С. 77 – 79.

54. **Зимин, А. И.** Применение аппаратов с прерывистым режимом течения в процессе производства топливных эмульсий / А. И. Зимин, В. Ф. Юдаев // Экологическая защита городов : тез. докл. науч.-техн. конф. – М., 1996. – С. 80.

55. **Зимин, А. И.** О влиянии стехеометрического соотношения Са/S в топливной дисперсии на степень очистки дымовых газов / А. И. Зимин, В. Н. Старцев, А. М. Балабышко // Повышение эффектив-

ности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения : тез. докл. Второй Междунар. теплофиз. шк. – Тамбов, 1995. – С. 110–111.

56. **Зимин, А. И.** Получение топливных дисперсий на основе жидкого топлива, ингибитора и поглотителя оксидов / А. И. Зимин, В. Н. Старцев // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения : тез. докл. Второй Междунар. теплофиз. шк. – Тамбов, 1995. – С. 112.

57. **Зимин, А. И.** Влияние стехиометрического соотношения Са/S в топливной эмульсии на степень очистки дымовых газов от оксидов серы и азота / А. И. Зимин, В. Н. Старцев, А. М. Балабышко // Проблемы безопасности труда на предприятиях со взрывопожароопасным производством : тез. докл. Междунар. науч.-техн. семинара. – Минск, 1995. – С. 78 – 80.

58. **Пигарев, Е. С.** Улучшение характеристик водомазутной эмульсии для судовых двигателей / Е. С. Пигарев, М. А. Промтов, Ю. Н. Киташов, С. Е. Пигарев // Технология нефти и газа. – 2014. – № 4. – С. 25 – 28.

59. **Использование** насоса-диспергатора для получения раствора полиакриламида / А. О. Никифоров, А. В. Коршаков, Ю. И. Авербух, Е. Ю. Сергеев // Химическое и нефтехимическое машиностроение. – 1990. – № 11 – С. 14–15.

60. **Расчет** дисперсности эмульсии, образующихся в роторно-статорном аппарате // Ю. И. Авербух, А. О. Никифоров, Н. М. Костин, А. В. Коршаков // Журнал прикладной химии. – 1988. – № 2. – С. 433–434.

61. **Кухленко, А. А.** Исследование закономерностей эмульгирования в роторно-пульсационном аппарате / Л. Л. Кухленко, И. С. Василишин, Л. Г. Карпов // Химическая промышленность сегодня. – 2008. – № 1. – С. 36 – 40.

62. **Зимин, А. И.** Гидромеханическое диспергирование в процессах приготовления экологически безопасного топлива / А. И. Зимин, М. А. Промтов, С. К. Карепанов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2000. – Вып. 3. – С. 67 – 70.

63. **Балабышко, А. М.** Эффективное применение роторных аппаратов для получения рабочих жидкостей гидросистем проходческой техники / А. М. Балабышко // Шахтное строительство. – 1990. – № 3. – С. 41 – 43.

64. **Балабышко, А. М.** Технология производства рабочих жидкостей для гидросистем горной техники / А. М. Балабышко // Горный журнал. – 1989. – № 8. – С. 39 – 42.

65. **Балабышко, А. М.** Установка для получения и регенерации рабочих жидкостей / А. М. Балабышко // Уголь. – 1989. – № 4. – С. 45 – 47.

66. **Балабышко, А. М.** Повышение надежности работы гидропривода механизированных крепей очистных компонентов / А. М. Балабышко. – М. : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1990. – 20 с.

67. **Балабышко, А. М.** Установка для приготовления и регенерации рабочей жидкости на добычном участке / А. М. Балабышко // Уголь. – 1990. – № 4. – С. 45 – 48.

68. **Балабышко, А. М.** Рабочие жидкости гидросистем и опыт их производства в угольной промышленности: (Обзор) / А. М. Балабышко. – М. : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1992. – 24 с.

69. **Балабышко, А. М.** Совершенствование установки для приготовления и подачи рабочей жидкости в гидросистемы механизированных комплексов с применением роторных аппаратов с модуляцией потока / А. М. Балабышко // Уголь. – 1991. – № 5. – С. 57 – 60.

70. **Зимин, А. И.** Приготовление и регенерация рабочих жидкостей для гидрооборудования механизированных крепей: гидромеханический аспект проблемы / А. И. Зимин // Горный журнал. – 1996. – № 5. – С. 42 – 44.

71. **Зимин, А. И.** Диспергирование рабочих жидкостей для гидрооборудования с учетом центробежного эффекта / А. И. Зимин // Уголь. – 1996, №10. – С. 23–24.

72. **Зимин, А. И.** Приготовление рабочей жидкости для гидросистем механизированных крепей в гидромеханических диспергаторах / А. И. Зимин, А. М. Балабышко, В. Н. Старцев // Применение роторных гидромеханических диспергаторов в горнодобывающей промышленности : тез. докл. Междунар. науч.-практ. семинара. – Солигорск, 1998. – С. 9 – 13.

73. **Зимин, А. И.** Теоретическое описание гидромеханического диспергирования шахтных эмульсий: нестационарный гидравлический подход / А. И. Зимин // Горная техника на пороге 21 века : тез. докл. Междунар. семинара. – М. : МГТУ, 1996. – С. 266–267.

74. **Юдаев, В. Ф.** Модель дробления капли природной эмульсии в нестационарном потоке гидродинамической сирены / В. Ф. Юдаев, В. И. Биглер, О. И. Данилычева // Ультразвук в технологии машиностроения : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Архангельск, 1991. – С. 215 – 217.

75. **Долинский, А. А.** Роторно-импульсный аппарат. 2. Локальный импульсный нагрев жидкости / А. А. Долинский, Б. И. Басок // Промышленная теплотехника. – 1999. – Т. 21, № 1. – С. 3 – 5.

76. **Долинский, А. А.** Роторно-импульсный аппарат. 3. Дробление включений дисперсной фазы / А. А. Долинский, Б. И. Басок // Промышленная теплотехника. – 1999. – Т. 21, № 2–3. – С. 5–6.

77. **Иванец, Г. Е.** Роторно-пульсационный аппарат для интенсификации стадии перемешивания при производстве комбинированных продуктов / Г. Е. Иванец, С. Н. Альбрехт, П. В. Плотников // Известия вузов. Пищевая технология. – 2000. – № 2–3. – С. 59 – 61.

78. **Будрик, В. Г.** Новое поколение диспергирующих устройств / В. Г. Будрик, Г. В. Будрик, Ю. А. Бродский // Пищевая промышленность. – 2003. – № 1. – С. 28 – 30.

79. **Балабышко, А. М.** Прогрессивное оборудование для получения высококачественных смазочно-охлаждающих жидкостей / А. М. Балабышко. – М. : ВНИИТЭМР, 1989. – 40 с.

80. **Балабышко, А. М.** Роторный аппарат с модуляцией потока для получения высоковязких СОЖ / А. М. Балабышко, А. И. Зимин // Вестник машиностроения. – 1990. – № 5. – С. 59–60.

81. **Цыбускина, И. И.** Кавитационно-тепловая обработка жидкостей как эффективный метод защиты от биопоражений / И. И. Цыбускина, В. В. Диженин, А. А. Викарчук // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 1(9). – С. 2266 – 2270.

82. **Червяков, В. М.** Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах / В. М. Червяков, В. Г. Однолько. – М. : Машиностроение-1, 2008. – 116 с.

83. **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.

84. **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.

85. **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. Родин, О. А. Чернышова // Химия растительного сырья. – 2008. – Вып. 3. – С. 65 – 70.

86. **Гимаев, И. Н.** Обоснование использования ультразвукового оборудования в технологии ликероводочного производства / И. Н. Ги-

маев, Н. К. Романова, О. А. Решетник. // Энерго- и ресурсосберегающие технологии. – 2004. – Вып. 2. – С. 99.

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

88. **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.

89. **Зимин, А. И.** Приготовление раствора эвкалимина в этиловом спирте в роторном аппарате при импульсном возбуждении кавитации / А. И. Зимин // Химико-фармацевтический журнал. – 1996. – № 10. – С. 46–47.

90. **Зимин, А. И.** Технология получения раствора эвкалимина в режиме импульсного возбуждения кавитации / А. И. Зимин // Научные химические технологии : тез. докл. 3 Междунар. конф. – Тверь, 1995. – С. 186.

91. **Зимин, А. И.** Абсорбция диоксида углерода водой в роторном аппарате с модуляцией потока / А. И. Зимин, В. Ф. Юдаев // Теоретические основы химической технологии. – 1989. – Т. 23, № 5. – С. 673 – 676.

92. **Иванец, В. Н.** Повышение эффективности газожидкостных процессов в роторно-пульсационном аппарате / В. Н. Иванец, С. Н. Альбрехт, Г. Е. Иванец // Химическая промышленность. – 2000. – № 11. – С. 46 – 48.

93. **Базадзе, Л. Г.** Воздействие кавитации на процесс разделения водно-спиртовой смеси / Л. Г. Базадзе, А. И. Зимин, В. Ф. Юдаев // Журнал прикладной химии. – 1989. – № 5. – С. 1166 – 1168.

94. **Химические** и физико-химические процессы в полях, создаваемых гидроакустическими излучателями / Р. Б. Валитов, А. К. Курочкин, М. А. Маргулис и др. // Журнал физической химии. – 1986. – № 4. – С. 889 – 892.

95. **Химические** и физико-химические процессы в полях, создаваемых гидроакустическими излучателями / Р. Б. Валитов, А. К. Курочкин, М. А. Маргулис и др. // Журнал физической химии. – 1986. – № 4. – С. 893 – 897.

96. **Лосев, Н. В.** Влияние интенсивных механических воздействий на скорость кислотного гидролиза крахмала / Н. В. Лосев, И. М. Липатова, Л. И. Макарова. // Журнал прикладной химии. – 2003. – Т. 76, вып. 6. – С. 1025 – 1029.

97. **Влияние** интенсивных механических воздействий на структуру гидрогелей крахмала. / И. М. Липатова и др. // Журнал прикладной химии. – 2001. – Т. 74, вып. 9. – С. 1517 – 1521.

98. **Юсова, А. А.** Влияние ПАВ на состояние крахмальных гидрогелей в условиях воздействия высоких напряжений сдвига / А. А. Юсова, И. М. Липатова, А. П. Морыганов // Журнал прикладной химии. – 2003. – Вып. 3. – С. 449 – 453.

99. **Алексеева, О. В.** Воздействие высокоскоростного сдвига на реологические свойства водных растворов смесей натрийкарбоксиметилцеллюлозы и гидроксипропилцеллюлозы / О. В. Алексеева, А. Н. Родионова, В. А. Падохин // Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, вып. 1. – С. 58 – 61.

100. **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.

101. **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.

102. **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.

103. **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.

104. **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.

105. **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.

106. **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 им. Г. И. Носова. – 2012. – Т. 3. – С. 55 – 58.

107. **Исследование** процесса автоклавно-содового выщелачивания шеелита в поле упругих колебаний / А. А. Бершитский, Н. Н. Хавский, Б. Н. Шмалей и др. // Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов : сб. науч. тр. – М. : Metallurgy, 1970. – С. 193 – 197.

108. **Промтов, М. А.** Механизмы генерирования тепла в роторном импульсном аппарате / М. А. Промтов, В. В. Акулин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 2А. – С. 364 – 369.

109. **Запорожец, Е. П.** Исследование вихревых и кавитационных потоков в гидравлических системах / Е. П. Запорожец, Л. П. Холпанов, Г. К. Зиберт, А. В. Артемов // Теоретические основы химической технологии. – 2004. – Т. 38, № 3. – С. 243 – 252.

110. **Evidence** for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation / R. P. Taleyarkhan, C. D. West, J. S. Cho, R. T. Lahey, R. I. Nigmatulin and R. C. Block // Science. – 2002. – V. 295. – P. 1868 – 1873.

111. **Nuclear** Emissions During Self-Nucleated Acoustic Cavitation / R. P. Taleyarkhan, C. D. West, R. T. Lahey, R. I. Nigmatulin, R. C. Block, Y. Xu // Phys. Rev. Lett. – 2006, January, 27. – PRL 96, 034301(1 – 4).

112. **Stringham, R.** When Bubble Cavitation Becomes Sonofusion / R. Stringham // In 237rd ACS National Meeting. Salt Lake City. 2009 – 26p.

113. **Смородов, Е. А.** Физика и химия кавитации / Е. А. Смородов, Р. Н. Галиахметов, М. А. Ильгамов. – М. : Наука, 2008. – 228 с.

114. **Маргулис, М. А.** Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях) : учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. ВУЗов / М. А. Маргулис. – М. : Высшая школа, 1984. – 272 с.

115. **Маргулис, М. А.** Синтез окислов азота в кавитационном поле гидродинамического излучателя / М. А. Маргулис, В. А. Гаврилов, Ф. Г. Шаяхметов // Журнал физической химии. – 1989. – Вып. 11. – С. 3088–3089.

116. **Маргулис, М. А.** Звукохимические реакции и сонолюминисценция / М. А. Маргулис. – М. : Химия, 1986. – 288 с.

117. **Маргулис, М. А.** Сонолюминисценция / М. А. Маргулис // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170, № 3. – С. 263 – 287.

118. **Механохимические** преобразования воды в высокоградиентных потоках / В. И. Волков, В. Н. Беккер, И. Б. Катраков и др. // Известия Алтайского государственного университета. – 2007. – № 3. – С. 63 – 70.

119. **Патент** РФ № 2054604, С1, 6 F 24 J 3/00, G 21 B 1/00. Способ получения энергии / Кладов А. Ф. – 1996. – Бюл. № 5.

120. **Золотухин, В. А.** Новая технология для переработки тяжелой нефти и осадков нефтеперерабатывающих производств / В. А. Золотухин

хин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 10. – С. 8 – 11.

121. **Курочкин, А. К.** Глубина переработки нефти свыше 90% – объективная реальность для любого НПЗ / А. К. Курочкин // Сфера Нефтегаз. – 2011. – № 3. – С. 110 – 120.

122. **Патент** № 2078116 РФ. Способ крекинга нефти и нефтепродуктов и установка для его осуществления / Кладов А. Ф. – 27.04.1997.

123. **Патент** № 2149886 РФ. Способ обработки нефти, нефтепродуктов, углеводородов / Быков И. Н., Бембель В. М., Колмаков В. А. и др. – 27.05.2000.

124. **Деструкция** углеводородов в кавитационной области в присутствии электрического поля при активации водными растворами электролитов / А. С. Бесов, К. Ю. Колтунов, С. О. Брулев и др. // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29, вып. 5. – С. 71 – 77.

125. **Влияние** кавитационного воздействия на углеводородное топливо / А. Ф. Немчин, В. А. Михайлик, Г. Т. Тодорашко, Е. В. Щепкин // Промышленная теплотехника. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 60 – 63.

126. **Suslick, K. S.** The Chemical Effects of Ultrasound / K. S. Suslick // Scientific American, 1989, February. – P. 80 – 86.

127. **Tao, R.** Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric or Magnetic Field / R. Tao, X. Xu. // Energy & Fuels. – 2006. – N 20(5). – P. 2046 – 2051.

128. **Промтов, М. А.** Импульсные технологии переработки нефти и нефтепродуктов / М. А. Промтов, А. С. Авсеев // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2007. – № 6. – С. 22 – 24.

129. **Промтов, М. А.** Кавитационная технология улучшения качества углеводородных топлив / М. А. Промтов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 2. – С. 6 – 8.

130. **Фролов, В. В.** Деструкция углеводородных соединений ультразвуком / В. В. Фролов, И. В. Мозговой // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – № 10. – С. 136 – 140.

131. **Нестеренко, А. И.** Возможность крекинга углеводородов под действием кавитации / А. И. Нестеренко, Ю. С. Берлизов // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – № 6. – С. 43–44.

132. **Исследование** химических превращений органических соединений при кавитационном воздействии / В. А. Яковлев, С. Г. Завазрухин, В. Т. Кузавов и др. // Химическая физика. – 2010. – Т. 29, № 3. – С. 43 – 51.

133. **Викарчук, А. А.** Технология и оборудование для обработки нефти и переработки твердых нефтешламов и жидких нефтеотходов / А. А. Викарчук, И. И. Растегаева, Е. Ю. Чернохаева // Вектор науки

Тольяттинского государственного университета. – 2012. – № 3(21). – С. 70 – 75.

134. **Промтов, М. А.** Технологии импульсного энергетического воздействия на нефть и нефтепродукты / М. А. Промтов // Экологический вестник России. – 2011. – № 3. – С. 14 – 16.

135. **Khachatryan, A. Kh.** Graphite-to-diamond Transformation Induced by Ultrasound Cavitation / A. Kh. Khachatryan, S. G. Aloyan, P. W. May // ScienceDirect. Diamond & Related Materials. – 2008. – N 17 – P. 931 – 936.

136. **Экспериментальное** подтверждение синтеза алмаза в процессе кавитации / Э. М. Галимов, А. М. Кудин, В. Н. Скоробогатский и др. // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 395, № 2. – С. 187 – 191.

137. **Стеблева, О. В.** Способ получения наночастиц углеродной фазы в процессе ультразвуковой кавитации / О. В. Стеблева, А. Л. Верещагин, Г. В. Леонов // Ползуновский вестник. – 2008. – Вып. 1–2. – С. 38 – 40.

138. **Промтов, М. А.** Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 861 – 869.

139. **Gogate, R. P.** Cavitation Reactors for Process Intensification of Chemical Processing Applications A Critical Review / P. R. Gogate // Chemical Engineering and Processing. – 2008. – V. 47. – P. 515 – 527.

140. **Gogate, R. P.** Application of Cavitation Reactors for Cell Disruption for Recovery of Intracellular Enzymes. / P. R. Gogate, A. B. Pandit // Journal Chemical Technology and Biotechnology. – 2008. – V. 83. – P. 1083 – 1093.

141. **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.

142. **Патент РФ 2173140 С1.** Способ получения кремнийорганических микрокапсул для создания медицинских косметических препаратов / Чубатова С. А., Тульский В. С. – 2001.

143. **Авдеева, Л. Ю.** Метод интенсификации процесса получения липосомных наноструктур при дискретном импульсном вводе энергии / Л. Ю. Авдеева // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, вып. 3. – С. 87 – 91.

144. **Levi, S. A.** Are S-S Bonds Responsible for the Sonochemical Formation of Proteinaceous Microspheres. The Case of Streptavidin / S. A. Levi, A. Gedanken // Biochem. J. – 2002. – V. 366. – 705 p.

145. **Levi, S. A.** An easy sonochemical route for the encapsulation of tetracycline in bovine serum albumin microspheres / A. Levi, Y. Nitzan, R. Dror, A. Gedanken // *J. Am. Chem. Soc.* – 2003. – v. 125(51). – P 15712 – 15713.

146. **Suslick, S. Kenneth.** Acoustic Cavitation and its Chemical Consequences / K. S. Suslick, Y. Didenko, M. M. Fang, T. Hyeon, et al. // *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* – 1999, Feb. 15. – V. 357, № 1751. – P. 335 – 353.

147. **Cabanas-Polo, S.** Effect of Reaction Conditions on Size and Morphology of Ultrasonically Prepared Ni(OH)<sub>2</sub> powders / S. Cabanas-Polo, K. S. Suslick, A. J. Sanchez-Herencia // *Ultrasonics Sonochemistry.* – 18 (2011). – P. 901 – 906.

148. **Формирование** структуры и свойств бетонов, модифицированных дисперсными добавками / А. А. Лушникова и др. // *Вестник ЮУрГУ.* – 2011. – № 16. – С. 30 – 33.

149. **Livage, J.** Amorphous Transition Metal Oxides / J. Livage // *J. Phys.* – 1981. – V. 42. – P. 981.

150. **Sugimoto, M.** Amorphous Characteristics in Spinel Ferrites Containing Glassy Oxides / M. Sugimoto // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1994. – V. 133. – P. 460.

151. **Landau, M. V.** Ultrasonically Controlled Deposition-Precipitation: Co-Mo HDS Catalysts Deposited on Wide-Pore MCM Material / M. V. Landau, L. Vradman, M. Herskowitz, Y. Koltypin, A. Gedanken // *J. Catal.* – 2001. – V. 201. – P. 22.

152. **Perkas, N.** Mesoporous Iron-titania Catalyst for Cyclohexane Oxidation / N. Perkas, Y. Wang, Yu. Koltypin, A. Gedanken, S. Chandrasekaran // *Chem. Comm.* – 2001. – P. 988.

153. **Ramesh, S.** Ultrasound Driven Deposition and Reactivity of Nanophasic Amorphous Iron Clusters with Surface Silanols of Submicrospherical Silica / S. Ramesh, Y. Koltypin, R. Prozorov, A. Gedanken // *Chem. Mater.* – 1997. – V. 9. – P. 546.

154. **Pol, V. G.** Sonochemical Synthesis and Optical Properties of Europium Oxide Nanolayer Coated on Titania / V. G. Pol, R. Reisfeld, A. Gedanken // *Chem. Mater.* – 2002. – V. 14. – P. 3920.

155. **United States Patent No. : US 7,157,058 B2 : High Power Ultrasonic Reactor for Sonochemical Applications.**

156. **Шиян, Л. Н.** Химия воды. Водоподготовка : учебное пособие / Л. Н. Шиян. – Томск : Изд-во ТПУ, 2004. – 72 с.

157. **Lorraine, 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. – N 19. – P. 710 – 717.

158. **Effect** of Hydrodynamic Cavitation on Zooplankton: a Tool for Disinfection / Subhash Shivram Sawant et al. // *Biochem. Eng. J.* – 2008. – N 42(3). – P. 320 – 328.

159. **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. – V. 72, N 9. – P. 414 – 422.

160. **Arrojo, S.** A Parametrical Study of Disinfection with Hydrodynamic Cavitation / S. Arrojo, Y. Benito, A. Martinez // *Science Direct. Ultrasonics Sonochemistry*. – 2007. – N 15. – P. 903 – 908.

161. **Kalumuck, K. M.** Remediation and Disinfection of Water Using Jet Generated Cavitation / K. M. Kalumuck, G. L. Chahine, C-T Hsiao, J-K Choi // *5th Int. Symp. on Cavitation – CAV2003*. – Osaka, Japan, November. – 2003.

162. **Mahvi, A. H.** Application of Ultrasonic Technology for Water and Wastewater Treatment // *Iranian J. Publ. Health*. – 2009. – V. 38, N 2. – P. 1 – 17.

163. **Тарасенков, Н. В.** Повышение эффективности очистки нефтезагрязненных сточных вод на флотационных установках / Н. В. Тарасенков, В. П. Панов // *Экология и промышленность России*. – 2005, июнь. – С. 28–29.

164. **Оботурова, Н. П.** Исследование влияния разрядно-импульсной обработки на микробиологические показатели жидких систем / Н. П. Оботурова, А. А. Нагдалян // *Сб. науч. тр. Ставропольский НИИ животноводства и кормопроизводства*. – 2012. – Т. 3, № 1–1. – С. 139 – 142.

165. **Шестаков, С. Д.** Исследования и опыт применения сонохимических технологий в пищевой промышленности / С. Д. Шестаков, О. Н. Красуля // *Электронный журнал «Техническая акустика»*. – 2010. – № 10. – С. 1 – 10. – URL : <http://www.ejta.org>.

166. **Беляев, А. Н.** Оценка эффективности использования гидродинамической кавитации при хлорировании воды / А. Н. Беляев, И. В. Флегентов, А. С. Суслов // *Глобальный научный потенциал*. – 2012. – № 4(13). – С. 20 – 22.

167. **Гимранов, Ф. М.** Оценка возможности использования комплексных методов обеззараживания воды в пищевой промышленности / Ф. М. Гимранов, А. Н. Беляев, И. В. Флегентов, А. С. Суслов // *Вестник Казанского государственного технологического университета*. – 2012. – № 8. – С. 289 – 291.

168. **Гимранов, Ф. М.** Гидродинамическая кавитация как метод интенсификации процесса озонирования в пищевых технологиях / Ф. М. Гимранов, А. Н. Беляев, И. В. Флегентов, А. С. Суслов // Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2012. – № 8. – С. 292 – 294.

169. **Патент** RU 2146231. Способ биологической очистки сточных вод / Степкин А. А., Степкина Ю. А. – 10.03.2010.

170. **Патент** RU 2388705. Способ аэробной биологической очистки сточных вод / Маршалов О. В., Юдаев В. Ф., Биглер В. И. – 27.04.2009.

171. **Цыбускина, И. И.** Кавитационно-тепловая обработка жидкостей как эффективный метод защиты от биопоражений / И. И. Цыбускина, В. В. Диженин, А. А. Викарчук // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2010. – Т. 12, № 1(9). – С. 2266 – 2270.

172. **Промтов, М. А.** Кавитационное обеззараживание жидких органических удобрений / М. А. Промтов, А. Е. Иванова, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 899 – 904.

173. **Промтов, М. А.** Технологический комплекс на базе роторного импульсного аппарата для приготовления жидких органических удобрений / М. А. Промтов, А. В. Алешин, А. Ю. Степанов // Химическая промышленность. – 2014. – Т. 91, № 1. – С. 27 – 29.

## 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА

---

### 2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ РОТОРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ АППАРАТОВ

При расчете роторных импульсных аппаратов необходимо различать две задачи: расчет и проектирование универсального аппарата, предназначенного для проведения гидромеханических и тепло-массообменных процессов в жидких средах; расчет и проектирование аппарата, предназначенного для конкретного технологического процесса. При решении первой задачи, когда проектируется многофункциональный аппарат, в расчет необходимо принимать, в первую очередь, технологические и энергетические критерии, а затем уже экономические, т.е. сначала необходимо оперировать критериями, показывающими техническую и технологическую эффективность, а затем при прочих равных условиях минимизировать затраты на изготовление аппарата. При решении второй задачи, когда технологическая цепочка и технологический цикл полностью определены, необходимо проводить расчет с использованием экономических критериев, например сроком окупаемости капитальных вложений и чистым дисконтированным доходом.

Универсальные РИА обычно используются в малотоннажном производстве с широким спектром номенклатуры производимого продукта и для решения исследовательских задач. В крупном промышленном производстве, а также, когда оправдано применение аппарата для проведения только одного технологического процесса, наиболее эффективным является использование специально спроектированного РИА для данного технологического процесса. Универсальные РИА проектируются таким образом, чтобы были задействованы и давали наибольшую отдачу основные факторы воздействия на жидкую гетерогенную обрабатываемую среду.

Роторные аппараты, которые в основном реализуют механическое и гидродинамическое воздействия на частицы гетерогенной среды, называются роторно-пульсационными аппаратами (РПА), гидродинамическими аппаратами роторного типа (ГАРТ), роторно-пульсационными гомогенизаторами (РПГ), насосами-гомогенизаторами (НГД), механоакустическими роторными гомогенизаторами (МАГ), кавитационными аппаратами (КАП) и др. Пульсационные 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. За рубежом аналогичные аппараты называются ULTRA-TURRAX, DISPAX-REACTOR (КА, Германия, США), 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 также и РИА. РПА эффективен для гетерогенных процессов с твердой фазой и вязкими жидкостями, а РИА – в маловязких системах жидкость–жидкость. Необходимо отметить, что четкой границы по факторам воздействия между РПА и РИА нет, и подобное разделение носит условный характер. Характерными конструктивными признаками РПА является наличие нескольких последовательных роторов и статоров (многоступенчатость), а зазор между ротором и статором одной ступени лежит в пределах 0,1...1,0 мм. Для РИА характерна одна ступень – один ротор и один статор – с зазором 0,05...0,10 мм и большим шагом расположения каналов в роторе и статоре. Наиболее активной рабочей зоной в РПА является зазор между ротором и статором (ступенями ротора и статора), в РИА – каналы статора.

Нами предложена уточненная и расширенная классификация конструкций и принципов организации функционирования пульсационных аппаратов роторного типа в табл. 2.1.

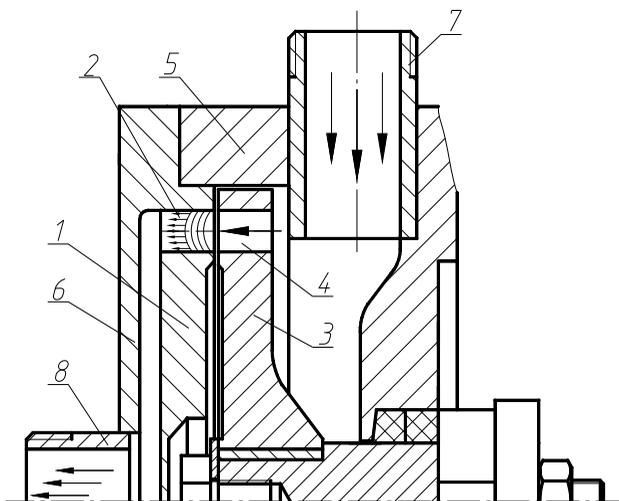
### 2.1. Классификация роторных импульсных (пульсационных) аппаратов

Признак	Тип
По типу организации процесса	– периодические; – непрерывные
По типу функционирования	– погружные; – вмонтированные; – проходные
По виду конструкции ротор–статор	– радиальные; – конические; – осевые

Продолжение табл. 2.1

Признак	Тип
Подвод обрабатываемой жидкости	– в полость ротора; – в полость статора
Подача обрабатываемой жидкости	– самовсасывание; – внешним насосом; – смешанная
По типу входного патрубка	– центральный; – тангенциальный
По типу сечения каналов в статоре и роторе	– круглые; – прямоугольные; – треугольные; – четырехугольные; – трапецеидальные; – сложной конфигурации
По направлению каналов	– прямые; – наклонные; – сходящиеся; – криволинейные; – пересекающиеся
По виду рабочей камеры	– тороидальная; – цилиндрическая; – коническая
По типу сечения рабочей камеры	– прямоугольная; – круглая; – другой формы
Зазор между ротором и статором	– регулируемый; – постоянный
По возможности замены статора на ротор	вместо статора установлен дополнительный ротор (конструкция с двумя коаксильными роторами, без статора)
По количеству ступеней	– одноступенчатые; – многоступенчатые
По расположению последовательно установленных неполных ступеней	– ротор–статор–ротор; – статор–ротор–статор
По расположению ротора и статора в одной ступени	– ротор–статор; – статор–ротор

Признак	Тип
По типу организации потоков в аппарате	– с рециркуляцией; – с полным отводом
По виду подвода компонентов жидкости	– совместный; – отдельный
По типу дополнительных диспергирующих элементов	– тела качения; – била; – ножи; – колебательные элементы
По виду расположения каналов в роторе и статоре	– однорядные; – многорядные; – по определенному закону
По материалу деталей, контактирующих с жидкостью	– чугун; – углеродистая сталь; – нержавеющая сталь; – цветной металл; – полимер; – композит; – керамика
По типу рабочей поверхности ротора и статора	– гладкая; – с произвольной шероховатостью; – поверхность специального профиля
По типу расположения центральных осей ротора и статора	– коаксильные; – с эксцентриситетом
Наличие дополнительных источников колебаний	– с дополнительным источником; – без дополнительного источника
По виду дополнительных источников колебаний	– механические; – гидродинамические; – электромагнитные; – гидромеханические
По организации прохождения жидкости через ступени	– параллельно; – последовательно



**Рис. 2.1. Роторный импульсный аппарат осевого типа с регулируемым зазором**

Схема одноступенчатого радиального РИА с нерегулируемым зазором была представлена на рис. 1.1. На рисунке 2.1. изображен роторный импульсный аппарат осевого типа с регулируемым зазором. Роторный импульсный аппарат содержит ротор 3 в форме диска, в котором выполнены каналы 4. К корпусу 5 прикреплена крышка 6, в которой установлен статор 1 в форме диска, имеющий каналы 2. В крышке 6 установлен патрубок 8 для выхода обрабатываемой жидкости, в корпусе 5 – патрубок 7 для входа обрабатываемой жидкости.

Роторный импульсный аппарат работает следующим образом. Обрабатываемая жидкость подается под давлением через входной патрубок 7, проходит через каналы ротора 4, каналы статора 2 и выводится из аппарата через выходной патрубок 8. При вращении ротора 3 его каналы 4 периодически совмещаются с каналами 2 статора 1. 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 в канале статора импульса избыточного давления вслед 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, вошедший в канал статора, стремится к выходу из канала, и инерционные силы создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию. Жидкость подвергается воздействию импульсов давления, способствующих интенсификации физико-химических процессов.

Преимуществом РИА осевого типа является возможность достаточно легкого и удобного регулирования величины зазора между ротором и статором, очистки рабочих поверхностей ротора и статора без полной 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 изготавливать ротор диаметром более 100...150 мм с частотой вращения ротора более 3000 об/мин.

## 2.2. АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА

К основным характеристикам технологического оборудования относятся параметры, определяющие эффективность работы или интенсивность обработки сырья и материала, потребляемая мощность и производительность.

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 [1]

$$N = K_N \rho n_0^3 D^4 b_n, \quad (2.1)$$

где  $K_N = f(\text{Re}_c \Gamma_1 \Gamma_2 \dots)$  – критерий мощности, определяемый из эксперимента;  $\text{Re}_c = \rho n_0 D^2 / \mu$  – центробежный критерий Рейнольдса;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с;  $\Gamma_1, \Gamma_2 \dots$  – симплексы геометрического подобия;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $n_0$  – частота вращения, об/с;  $D, b_n$  – диаметр и высота (длина) перемещающего органа, м.

По методике расчета, разработанной М. А. Балабудкиным, мощность определяется без учета влияния расхода для аппарата с прямоугольными прорезями, расчет мощности можно производить по формуле [1]

$$N = C_1 \operatorname{Re}_c^{-q_3} (\delta / D)^{q_4} [(S_B + S_H) / D]^{q_2} (\Delta / D)^{q_1}; \quad (2.2)$$

$$[1 + C_2 Q(a_1 z_1 + a_2 z_2) / (V_0 b_n \Delta)] \rho S_c V_0^3.$$

В работе [2] представлена зависимость критерия мощности от критерия Рейнольдса и геометрических симплексов подобия, выведенная на основании экспериментальных исследований. В работах [3, 4] получены выражения для критерия мощности, учитывающие влияние геометрических и режимных параметров роторного аппарата. В работе [5] расчет энергопотребления в радиальном зазоре опирается на гидродинамическую модель Куэтта.

В работе [6] уравнение для расчета потребляемой мощности имеет вид

$$N = 22,5 \cdot 10^6 \cdot \operatorname{Re}_M^{-1,17} \left( \frac{\delta}{R_p} \right)^{0,2} \left( \frac{az_p}{R_p} \right)^{0,7} \rho h \omega^3 R_p^4, \quad (2.3)$$

где  $\operatorname{Re}_M = \omega \rho R_p^2 / \mu$ .

В работе [7] мощность привода  $N$  рассчитывается через энергетический баланс, который состоит из следующих слагаемых:

$$N = N_k + N_r + N_t + N_a + N_0, \quad (2.4)$$

где  $N_k = 0,5 \rho Q V^2$  – мощность, требуемая для сообщения кинематической энергии жидкости, вытекающей из отверстий ротора;  $V^2 = V_0 + \omega^2 R^2$  – средняя скорость течения жидкости в отверстии ротора;  $N_r = \Delta P Q$  – мощность, требуемая для преодоления сопротивления в трубопроводах;  $\Delta P$  – 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;  $\mu$  – 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 [8] 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 счет источника.

Уравнение для расчета энергозатрат в РИА в условиях автоколебаний может быть записано в виде [8]

$$N = N_1 + CN_2, \quad (2.5)$$

где  $C$  – эмпирический коэффициент;  $N_1 = FV_1$  – энергозатраты в паре ротор–статор;  $F = \tau(S_1 + S_2)$  – сила, действующая на поток жидкости;  $\tau$  – 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 работах [9 – 11] В. М. Червяковым предложены методики расчета мощности для РИА как с цилиндрическими 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.

$$N = N_k + N_{T1} + N_{T2} + N_M, \quad (2.6)$$

где  $N_k$  – мощность, требуемая для передачи кинетической энергии жидкости, присутствующей во вращающемся роторе определяется соотношением

$$N_k = 0,5\rho Q\omega^2 R_2^2; \quad (2.7)$$

$N_{T1}$ ,  $N_{T2}$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в радиальном зазоре и в осевом зазоре.

$$N_{T1} + N_{T2} = \left( \frac{2(\text{Re} + 2)\pi H_p^* \mu \omega^2 R_2^2 R_c^{\text{Re}+2}}{R_c^{\text{Re}+2} - R_2^{\text{Re}+2}} \right) + \left( 0,308\pi \omega^{5/2} \nu^{1/2} \rho (R_2^4 - R_3^4) \right), \quad (2.8)$$

где  $H_p^*$  – высота боковой поверхности цилиндрического ротора, м;  $R_2$  – наружный радиус цилиндрического ротора;  $R_c$  – внутренний радиус цилиндрического статора, м;  $R_3$  – конструктивный радиус, м;  $N_M$  – мощность, необходимая для преодоления сил трения в подшипниках, уплотнениях и т.п. (механические потери в конструкции роторного аппарата).

В работе [12] энергозатраты привода РИА рассматриваются как распределение мощности на создание напора, преодоление механических, объемных и гидравлических потерь, а также на преодоление различных сопротивлений в рассматриваемой системе ротор–статор:

$$N = N_{\Gamma} + N_{\text{д}} + N_{\text{и}} + N_{\text{м}} + N_{\text{о}} + N_{\text{y}}, \quad (2.9)$$

где  $N_{\Gamma}$  – гидравлическая мощность, т.е. мощность, передаваемая жидкостью в роторе;  $N_{\text{д}}$  – диссипируемая мощность, т.е. затраты мощности на трение жидкости в межцилиндровых зазорах –  $N_{\text{дз}}$  и дисковое трение в зазоре между ротором и корпусом  $N_{\text{дд}}$ ;  $N_{\text{и}}$  – мощность, расходуемая на деформацию и измельчение твердых частиц, присутствующих в обрабатываемом продукте, которую можно определить за счет энергетического баланса;  $N_{\text{м}}$  – мощность, расходуемая на трение в подшипниках, в уплотнениях вала;  $N_{\text{о}}$  – 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, в инженерных расчетах  $N_{\text{о}} = 0$ ;  $N_{\text{y}}$  – потери мощности, связанные с утечками жидкости через уплотнение.

В работе [13] расчет энергозатрат определен диссипативными потерями в радиальном зазоре на основании сложной структуры потока, с использованием плоской модели турбулентного течения.

$$N = k \frac{a_c + a_p}{a_c + b_c} N_1 + k \frac{b_c - a_p}{a_c + b_c} (N_{\text{I}} + N_{\text{II}} + N_{\text{III}} + N_{\text{IV}}); \quad (2.10)$$

$$N_{\text{I}} = \mu(b_c - a_p)zh \int_0^{\delta} \left( \frac{\partial V_{\omega R}}{\partial y} \right)^2 dy; \quad N_{\text{I}} + N_{\text{III}} = \frac{1}{2} \rho Q (V_p^2 + \omega^2 R_p^2 - V_c^2);$$

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

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

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

$$V_p = \frac{Q}{a_p h}; \quad V_c = \frac{Q}{a_c h}; \quad Q = \frac{h \Delta P \delta^3}{6\mu l_{\text{cp}}};$$

$$S = \frac{1}{2} (b_c - a_p) zh; \quad l_{\text{cp}} = (b_c - a_p) / 2;$$

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

В работе [14] мощность привода электродвигателя рассчитывается по формуле

$$N = N_{\text{упл}} + N_{\text{хх}} + N_{\text{дис макс}}, \quad (2.11)$$

где  $N_{\text{упл}}$  – мощность, потребляемая уплотнениями;  $N_{\text{хх}}$  – мощность холостого хода;  $N_{\text{дис макс}}$  – мощность диссипации сил трения;  $N_{\text{дис макс}} = M_{\text{дис}} \omega$ , вычисляется по формуле

$$N_{\text{дис макс}} = \pi \eta R^3 \omega^2 \left( \frac{2H_p}{\delta_{\text{мин}}} + \frac{R}{d_{\text{мин}}} \right).$$

В работе [15] получено соотношение, объединяющее основные геометрические параметры аппарата осевого типа и свойства обрабатываемой среды:

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k \frac{\pi \mu \text{Re}_{zi}}{4h_i} \frac{\omega^2 (R_d^4 - R_b^4)}{(1 - e^{-\text{Re}_{zi}})} + \sum_{i=1}^k \left[ \left( \frac{G}{\rho n_i S_{\text{отв}_i}} \right) \frac{\pi \rho (R_d^2 - R_b^2)}{2} + \left( \frac{\omega^2 G}{2n_i} \sum_{j=1}^{n_i} r_j^2 \right) \right], \quad (2.12)$$

где  $i$  – число ступеней (зазоров) между неподвижными и вращающимися дисками,  $1 \leq i \leq k$ ;  $n_i$  – число отверстий  $i$ -го диска;  $S_{\text{отв}_i}$  – площадь отверстия  $i$ -го диска,  $\text{м}^2$ ;  $h_i$  – величина зазора между дисками  $i$ -й ступени,  $\text{м}$ ;  $R_d$  – радиус диска,  $\text{м}$ ;  $R_b$  – радиус вала,  $\text{м}$ ;  $G$  – массовый расход обрабатываемой смеси,  $\text{кг/с}$ ;  $S_{\text{отв}}$  – площадь каждого отверстия диска,  $\text{м}^2$ ;  $\text{Re}_z = \frac{v_z \rho h}{\mu}$  – осевой критерий Рейнольдса. Показано, что затраты

мощности возрастают пропорционально квадрату скорости вращения ротора и четвертой степени диаметра дисков.

Рассмотренные подходы к расчету мощности сложны ввиду большого объема вычислений, достаточно большого числа коэффициентов и многообразия исходных данных. Для реализации инженерного расчета параметров РИА с наименьшими затратами времени и достаточной точностью необходимо разрабатывать методики без сложных математических моделей.

Важной режимной характеристикой РИА является производительность или расход жидкости через аппарат. На основе формулы для расчета расхода жидкости  $Q$  через участок трубопровода с перепадом давления  $\Delta P$

$$Q = VS = \mu S \sqrt{2\Delta P / \rho}, \quad (2.13)$$

в работе [16] были получены аппроксимирующие выражения для среднего коэффициента расхода. Здесь  $\mu$  – коэффициент расхода,

определяемый гидравлическим сопротивлением участка трубопровода с площадью поперечного сечения  $S$ ;  $V$  – скорость потока.

Расход через аппарат с числом каналов в статоре  $Z_c$  определяли в соответствии с выражением [14, 17]

$$Q = Z_c \mu S_c \sqrt{2\Delta P / \rho}. \quad (2.14)$$

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 [18]

$$Q(t) = Q_{\min} + \frac{\omega R}{a} \begin{cases} (Q_{\max} - Q_{\min})t, & 0 \leq t \leq \frac{a}{\omega R}; \\ (Q_{\max} - Q_{\min})\left(\frac{2a}{\omega R} - t\right), & \frac{a}{\omega R} \leq t \leq \frac{2a}{\omega R}; \\ 0, & \frac{2a}{\omega R} \leq t \leq \frac{(a+b)}{\omega R}. \end{cases} \quad (2.15)$$

Здесь  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$  – значения расхода соответственно при совпадающих и перекрытых каналах, м<sup>3</sup>/с. Позднее формула (2.15) видоизменилась, но смысл ее не менялся.

Зависимость расхода, по данным публикации [1], имеет вид

$$Q(t) = Q_m \left( k - \cos \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (2.16)$$

где  $k = \bar{Q} / Q_m$ ;  $\bar{Q}$  – среднее значение расхода, м<sup>3</sup>/с;  $Q_m$  – амплитуда изменений расхода, м<sup>3</sup>/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 [19 – 22]:

$$V(t) = Q(t) / S(t); \quad (2.17)$$

где  $V(t)$  – скорость в канале статора в момент времени  $t$ , м/с;  $Q(t)$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $S(t)$  – площадь проходного сечения, м<sup>2</sup>.

Давление определяется по формуле

$$P(t) = \rho V^2(t) / 2. \quad (2.18)$$

Движение потока жидкости в каналах ротора и статора РИА [23] при модуляции потока несжимаемой жидкости в гидродинамической сирене записано в форме уравнения Бернулли:

$$\rho l \frac{dV}{dt} + \rho \frac{V^2}{2} = \Delta P, \quad (2.19)$$

где  $l = l_p + l_c + \delta$ ;  $l$  – длина пути жидкости в прерывателе, м;  $l_p$ ,  $l_c$  – длины каналов ротора и статора, м;  $\delta$  – зазор между ротором и статором, м;  $\Delta P$  – перепад давления между полостью ротора и рабочей камерой, Па;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

В работах [16, 24] в уравнение Бернулли (2.19) добавлен переменный коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi(t)$ , в работах [16, 24 – 26] – коэффициент гидравлических потерь в зависимости от скорости потока –  $B(t)$ . Авторами работ [16, 24, 26] было предложено воспользоваться методикой расчета и справочными данными для стационарных коэффициентов гидравлических сопротивлений и ввести член уравнения, учитывающий потери на трение по длине канала  $\xi_{тр} = \lambda l/d$ , [31 – 33]. В работах [7, 34, 35] определены основные критерии подобия, характеризующие нестационарные гидромеханические процессы в аппарате, критерии гомохронности (Ho) и Рейнольдса (Re). В работах [34 – 36] выбирается средняя расходная скорость в качестве масштаба скорости.

С учетом данных поправок, формула (2.19) была преобразована к виду [13]

$$\beta \rho l \frac{dV}{dt} + \lambda \rho \frac{IV^2}{2d_s} + \xi(t) \rho \frac{V^2}{2} + \frac{B(t)\mu V}{2d_s} = \Delta P, \quad (2.20)$$

где  $d_s$  – эквивалентный гидравлический диаметр, м;  $\beta$  – коэффициент количества движения, определяемый экспериментальным путем [27].

Большой вклад в развитие модели истечения газожидкостной среды через прерыватель РИА сделан в работах В. Ф. Юдаева [7, 16, 18, 32, 34, 35, 37, 45]. Качественно новое развитие теории нестационарных гидромеханических процессов и моделирования течения жидкости через прерыватель РИА осуществлено в работах А. И. Зимина [34 – 36, 38, 43].

Уравнение (2.19) модернизировано к виду

$$\left( l + (1 + \Gamma) \sqrt{\frac{S_0}{\pi}} \right) \frac{dV}{dt} + \frac{1}{2} \left( \xi(t) V^2 + \frac{BVv}{d_s} \right) = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\omega^2 R_p^2}{2}, \quad (2.21)$$

где  $\Gamma$  – квадратный корень из отношения площади выходного отверстия канала статора к площади входного отверстия канала ротора;

$S_0$  – площадь поперечного сечения выходного отверстия канала статора,  $\text{м}^2$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $\text{Н/м}$ ;  $\omega$  – угловая скорость ротора,  $\text{с}^{-1}$ ;  $R_p$  – радиус наружной поверхности ротора,  $\text{м}$ .

В работах [5, 39] в качестве характеристики расхода жидкости принята среднемассовая радиальная скорость течения среды:

$$\bar{V}_r = \frac{1}{t} \int_0^t V_c(\tau) d\tau, \quad (2.22)$$

где  $\bar{V}_r$  – среднемассовая радиальная скорость,  $\text{м/с}$ ;  $V_c$  – средняя по сечению радиальная скорость,  $\text{м/с}$ ;  $t$  – время совмещения канала ротора с каналом статора,  $\text{с}$ .

В работе [40] предложена методика расчета закономерностей течения жидкости в модуляторе роторного аппарата с применением уравнения неразрывности и дифференциального уравнения относительного движения жидкости [14]. Конечно-разностный метод расчета течений в плоских каналах с произвольными криволинейными границами описан в [41].

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

$$P = \frac{\rho}{2} (V_1^2 + V_2^2). \quad (2.23)$$

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

Формула (2.23) лишь качественно отражает действительные процессы по флуктуациям давления в РИА.

В [43] предположено, что давление зависит от расхода (радиальная скорость линейно связана с производительностью, т.е. с расходом) квадратично.

Сопин А. И. [46, 47] предложил рассчитывать переменное давление, генерируемое в аппарате по зависимостям:

$$P(t) \sim Q(t) = VS(t). \quad (2.24)$$

Для амплитудного значения давления, генерируемого при прерывании потока в аппарате, В. Ф. Юдаевым предложено [37, 45] выражение

$$P_m = \frac{\rho R_p^2}{Z_c a^2} \frac{\Omega(Q - Q_T)}{h} \sqrt{\frac{1}{Z_p}} \ln \frac{R_p}{R_n}, \quad (2.25)$$

где  $\rho$  – 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.

В работе [32] для расчета амплитуды давления предлагается формула

$$P_m = kdQ_1(t)/dt, \quad (2.26)$$

где  $Q_1(t)$  – переменный расход через одно отверстие, м<sup>3</sup>/с;  $k$  – некоторая постоянная, зависящая от плотности жидкости и размеров отверстия.

Давление, генерируемое потоком из отверстия площадью  $S$ , на расстоянии  $r$  от него в линейном приближении составляет [45]

$$P(r, t) = \frac{\rho S}{4\pi r} \frac{\partial v(t - r/c)}{\partial t}, \quad (2.27)$$

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

С учетом теории генерации возмущений давления [48, 49] расчет амплитуды импульсного давления предлагается по формуле [17]

$$P = \rho l \left| \frac{dv}{dt} \right|_{\max}. \quad (2.28)$$

В работе [32] расчет амплитуды импульса давления выполняется по выражению

$$P = \frac{\rho S_c}{\Omega r} \left| \frac{dv}{dt} \right|_{\max}, \quad (2.29)$$

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

В работах [13, 50] предложен подход по определению изменения давления в канале статора на основе уравнения (2.29) для всего периода открытия – перекрытия канала статора аппарата, основанный на уточненном уравнении.

В настоящее время наиболее исследованным и подтвержденным экспериментальными данными является уравнение Бернулли, записанное в виде формул (2.20), (2.21). На основе этого уравнения можно определить скорость, ускорение, расход, импульсное давление потока жидкости в канале статора РИА.

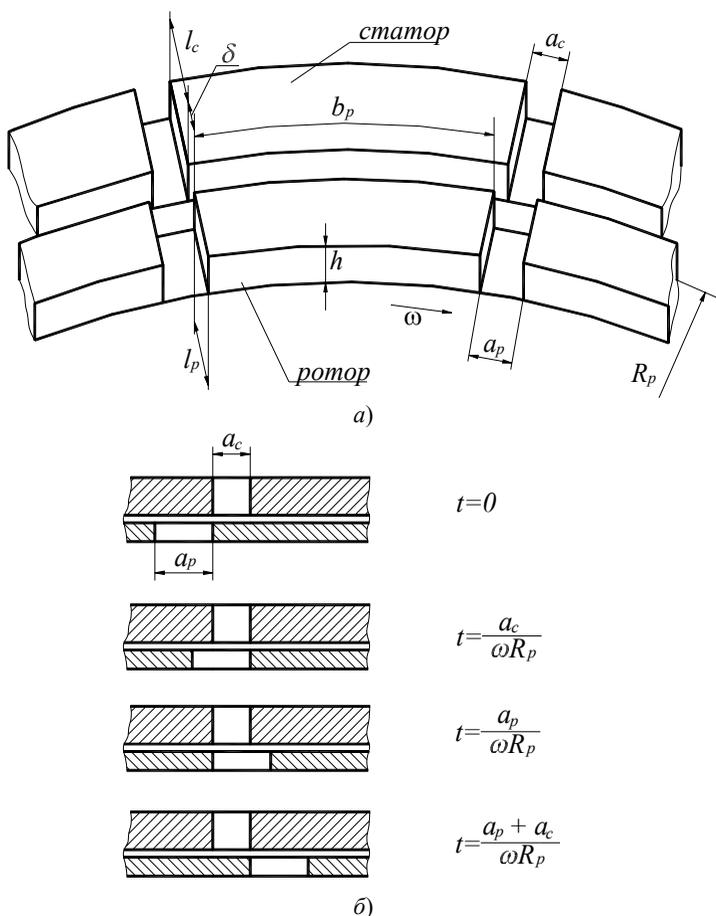
## 2.3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА РАДИАЛЬНОГО ТИПА

### 2.3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ЖИДКОСТИ В РИА

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. Преимуществом конструкции радиального типа является создание центробежных сил, действующих на жидкость внутри полости ротора и увеличивающих движущую силу – перепад давления между полостью ротора и рабочей камерой.

Типичная схема одноступенчатого РИА радиального типа показана на рис. 1.2. При вращении ротора его каналы периодически совмещаются с каналами статора. 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 в канале статора импульса избыточного давления вслед за ним возникает кратковременный импульс пониженного («отрицательного») давления, так как совмещение каналов ротора и статора завершилось, и подача жидкости в канал статора происходит только за счет «транзитного» течения из радиального зазора между ротором и статором. Объем жидкости, вошедший в канал статора, стремится к выходу из канала, и инерционные силы создают локальные зоны понижения давления в жидкости, что вызывает кавитацию.

Ротор и статор с каналами можно назвать прерывателем потока жидкости в аппарате. На рисунке 2.2. показана схема прерывателя с прямоугольными каналами в изометрии и характерные положения канала ротора относительно канала статора при вращении ротора. В момент времени  $t = 0$  (рис. 2.2, б) канал ротора начинает совмещаться с каналом статора, но площадь проходного сечения в данный момент времени минимальна,  $S = S_{\min}$ . При увеличении  $t$  от 0 до  $t < a_c / (\omega R_p)$  происходит увеличение площади проходного сечения канала статора, его «открытие». В момент времени  $a_c / (\omega R_p) \leq t \leq a_p / (\omega R_p)$  выход канала ротора полностью совмещен с входом канала статора, который



**Рис. 2.2.** Схема ротора и статора с прямоугольными каналами (а) и характерные положения канала ротора относительно статора (б)

«открыт»,  $S = S_{\max}$ . При дальнейшем движении канала ротора площадь проходного сечения уменьшается, происходит «закрывание» канала статора на интервале  $a_p/(\omega R_p) \leq t \leq (a_p + a_c)/(\omega R_p)$ . В момент времени  $t = (a_p + a_c)/(\omega R_p)$  канал статора «закрыт»,  $S = S_{\min}$ .

Длительность интервала времени, на котором канал статора остается закрытым, ограничена значениями  $(a_p + a_c)/(\omega R_p) \leq t \leq (b_c + a_c)/(\omega R_p)$ .

Перед открытием канала статора давление внутри него практически равно давлению в камере. При открытии канала статора скорость

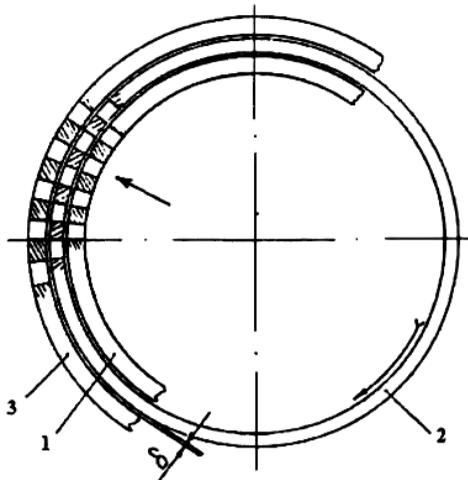
потока линейно возрастает от исходного значения  $V_{\min}$  до максимального  $V_{\max}$ , а затем резко падает до  $V_{\min}$  при полном закрытии канала статора. В этот момент времени давление в канале статора возрастает, а объем жидкости, вошедший в канал статора, продвигается вперед за счет инерционных сил. За импульсом избыточного давления возникает резкое кратковременное понижение давления, а затем повышение давления. Если период времени, когда канал статора закрыт, достаточно длителен, то происходит несколько флуктуаций давления и скорости потока, связанных с действием инерционных сил.

Пульсации давления и скорости потока также распространяются в полости и канале ротора, но их амплитуда мала по сравнению с пульсациями в канале статора. Это связано с тем, что в полость и канал ротора жидкость нагнетается под давлением и кратковременный импульс увеличения скорости в канале ротора мгновенно гасится за счет мощного напора жидкости, создаваемого либо внешним источником давления, либо центробежным давлением, либо и тем и другим.

Рабочая камера, ее иногда называют камерой озвучивания, по своей сути практически является коллектором для жидкости, прошедшей через каналы статора. При коротких каналах статора (в гидравлике принято считать каналы короткими при отношении длины  $l$  к диаметру  $d$  меньше 3) рабочая камера принимает на себя основной гидроакустический и гидромеханический импульс, но он также быстро гасится за счет большого присоединенного объема жидкости и мощно кругового потока.

С нашей точки зрения, каналы статора необходимо выполнять длинными ( $l/d \geq 3$ ), чтобы обрабатываемая жидкость подвергалась мощному гидродинамическому и гидроакустическому воздействию в небольшом, по сравнению с объемом рабочей камеры, технологическом объеме. Однако делать канал статора как можно длиннее также не оправдано потому, что излучаемый импульс затухает, распространяясь вдоль канала статора, и существуют конструктивные, технологические и экономические ограничения на геометрические параметры аппарата.

Схема прерывателя может быть в нескольких вариантах дополнительно к рассмотренной выше. Первый вариант – это схема с одним ротором и двумя статорами (рис. 2.3), 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 [39].



**Рис. 2.3. Схема прерывателя РИА с двумя статорами (1 и 3) и ротором (2) между ними**

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 по первому и второму вариантам выполнен в монографии [39]. 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.

Наиболее часто РИА рассчитывают по критерию наибольшего воздействия на обрабатываемую среду при наименьших затратах на потребляемую энергию при заданной производительности. В качестве параметра, определяющего степень воздействия на обрабатываемую жидкость, целесообразно принять амплитуду импульса давления, генерируемого в канал статора.

Импульсное давление, генерируемое в канал статора, определяется по формуле [38, 43]

$$P_{и}(t) = \rho \frac{dV}{dt} \left[ \frac{S_0}{2\pi} \right]^{0,5}, \quad (2.30)$$

где  $S_0$  – площадь сечения канала статора, для прямоугольного профиля сечения канала статора  $S_0 = a_c h_c$ ;  $a_c$ ,  $h_c$  – ширина и высота прямо-

угольных каналов статора, м;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $V$  – скорость жидкости в канале статора, м/с.

Математическая модель, достаточно полно отражающая основные закономерности нестационарных гидромеханических процессов в канале статора аппарата, базируется на уравнении Бернулли, записанном в нестационарной форме [13, 38, 43, 51]:

$$\beta l \frac{dV}{dt} + \lambda(t) \frac{lV^2}{2d_s} + \xi(t) \frac{V^2}{2} + \frac{B(t)vV}{2d_s} = \frac{\Delta P}{\rho}, \quad (2.31)$$

где  $\beta$  – коэффициент количества движения потока жидкости через прерыватель;  $l = l_c + \delta + l_p$  – длина прерывателя, м;  $\delta$  – величина зазора между ротором и статором, 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;  $l_{c,p}$  – длина канала статора, ротора, м;  $\xi(t)$  – суммарный коэффициент местного гидравлического сопротивления;  $B(t)$  – коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий потери напора, линейно зависящие от скорости потока;  $v$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\Delta P$  – общий перепад давления между полостью ротора и камерой статора, Па;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ .

Нестационарное уравнение Бернулли позволяет определить скорость  $V(t)$ , ускорение  $dV/dt$ , расход  $Q(t)$  жидкости и амплитуду импульсов давления  $P_n(t)$ . Методы решения уравнения (2.31) приведены в литературе [13, 38, 43, 51].

По этим зависимостям можно определить значения кинематических и динамических параметров потока жидкости:

$$V = \frac{1}{t} \int_0^t V(t) dt; \quad (2.32)$$

$$\Delta P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P(t) dt; \quad (2.33)$$

$$v = S_0 \int_0^t V(t) dt. \quad (2.34)$$

Принимаем  $a = a_c = a_p$ ,  $b = b_c = b_p$ ,  $h = h_c = h_p$ . С учетом этого запишем:

$$S_0 = ah ; \quad (2.35)$$

$$T = \frac{a+b}{\omega R_p} ; \quad (2.36)$$

$$t = 2a / (\omega R_p) ; \quad (2.37)$$

$$d_3 = 2ah / (a + h) . \quad (2.38)$$

В общий перепад давления между полостью ротора и камерой статора входит статическое давление  $P_{ст}$ , создаваемое насосом, который под давлением нагнетает жидкость в полость ротора, а также давление, создаваемое за счет увлечения жидкости во вращательное движение в полости ротора. Принимаем, что жидкость полости ротора вращается со скоростью, равной скорости вращения ротора, что возможно при наличии лопаток в роторе. В этом случае длина  $l_p$  практически не играет роли для расчета центробежного давления.

Центробежное давление за счет разгона жидкости при наличии лопаток в роторе определяется по формуле

$$P_{ц} = \rho \omega^2 R_p^2 . \quad (2.39)$$

Таким образом, общий перепад давления на прерывателе аппарата, создаваемый нагнетательным насосом и вращением жидкости в роторе аппарата, можно записать в виде

$$\Delta P = P_{ст} + \rho \omega^2 R_p^2 - P_c . \quad (2.40)$$

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 патрубков, равный по площади проходного сечения площади проходного сечения входному патрубку, и открытую гидравлическую систему на выходе.

Для решения нестационарного уравнения Бернулли необходимо знать значения коэффициента  $\beta$  и коэффициентов гидравлических сопротивлений:  $\lambda(t)$ ,  $\xi(t)$ ,  $B(t)$ . Трудность определения коэффициентов гидравлических сопротивлений состоит в том, что они являются переменными во времени величинами, а величину коэффициента количества движения  $\beta$  требуется определять экспериментальным путем [27]. При этом следует учитывать, что коэффициент количества движения  $\beta$  является нестационарной величиной. Для инженерных расчетов, как правило, коэффициент количества движения принимается равным единице,  $\beta = 1$ .

Следует заметить, что коэффициент гидравлического сопротивления трения  $\lambda(t)$  существенно меньше местного гидравлического сопротивления  $\xi(t)$ , поэтому им можно пренебречь. Коэффициенты  $\xi(t)$  и  $B(t)$  находятся из предположения, что прерыватель представляет собой механизм, который сужает поток жидкости, поэтому гидравлическое сопротивление прерывателя РИА можно рассчитывать по формулам, применяемым для расчета диафрагм.

Коэффициент местного гидравлического сопротивления  $\xi(t)$  зависит от площади  $S(t)$ , свободной для протекания обрабатываемой среды, и коэффициента  $\varepsilon$ , который определяется из таблицы Жуковского (табл. 2.2) [38].

**Таблица 2.2**

$s$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,5
$\varepsilon$	0,611	0,612	0,616	0,622	0,633	0,644	0,662	0,687	0,722	0,781	1,000	0,644

В таблице 2.2 вместо площади свободного сечения прерывателя взята относительная площадь  $s = \frac{S}{S_0}$ . Данные из табл. 2.1 с помощью аппроксимации представляются в виде функции, которая имеет вид

$$\varepsilon(s) = \frac{1}{\frac{4,5}{\exp(s)} - 2,88 \cdot \exp(s) + 7,17s}. \quad (2.41)$$

Для расчета величины  $B(t)$  использовали табл. 2.3 из справочника гидравлических сопротивлений [25].

**Таблица 2.3**

$s$	1,00	0,75	0,50	0,25
$B$	75	350	1300	3000

Данные из табл. 2.3 могут быть представлены с помощью аппроксимации в виде функции

$$B(s) = \exp(-10,58s^2 + 8,18 \cdot \exp(s) - 7,34s). \quad (2.42)$$

Относительная площадь проходного сечения прерывателя при вращении ротора РИА определяется по формуле [43]

$$s(t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{t\omega R_p}{a_c}\right) \sqrt{\left(\frac{t\omega R_p}{a_c}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{a_c}\right)^2} + \left(\frac{t\omega R_p}{a_c}\right)^2; & 0 \leq t \leq \frac{a_c}{\omega R_p}; \\ 1; & \frac{a_c}{\omega R_p} < t \leq \frac{a_p}{\omega R_p}; \\ \left(\frac{t\omega R_p}{a_c} - \frac{a_p}{a_c}\right) \sqrt{\left(\frac{a_p}{a_c} + 1 - \frac{t\omega R_p}{a_c}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{a_c}\right)^2} + \left(\frac{a_p}{a_c} + 1 - \frac{t\omega R_p}{a_c}\right)^2; & \frac{a_p}{\omega R_p} < t \leq \frac{a_p + a_c}{\omega R_p}; \\ \frac{\delta}{a_c}; & \frac{a_p + a_c}{\omega R_p} < t \leq \frac{b_c - a_p}{\omega R_p}. \end{cases} \quad (2.43)$$

Коэффициент местного гидравлического сопротивления определяем по формуле [43]

$$\xi(t) = \left(\frac{1}{\varepsilon(s)s(t)} - 1\right)^2. \quad (2.44)$$

Эта формула верна при малых значениях зазора, при этом должно выполняться неравенство  $0 \leq \frac{\delta}{a_c} \leq 0,3$ .

Для решения дифференциального уравнения (2.31) необходимо задать начальное условие для ускорения

$$\left.\frac{dV}{dt}\right|_{t=0} = 0. \quad (2.45)$$

Начальное условие для скорости  $V(0)$  находится путем решения уравнения (2.31) при условиях (2.45) и  $t = 0$ . Получается квадратное уравнение относительно  $V(0)$ :

$$V^2(0) \cdot \frac{1}{2} (\xi(0)) + V(0) \frac{B(0)\mu}{2d_3\rho} - \frac{\Delta P}{\rho} = 0. \quad (2.46)$$

Решение уравнения (2.46) представляет собой совокупность двух корней, один из которых отрицательный. Отрицательная величина скорости не имеет физического смысла (поток жидкости устремлен навстречу перепаду давления). Начальное значение для скорости имеет вид

$$V(0) = \frac{-\frac{B(0)\mu}{2d_3\rho} + \sqrt{\left(\frac{B(0)\mu}{2d_3\rho}\right)^2 + 2(\xi(0))\frac{\Delta P}{\rho}}}{\xi(0)}. \quad (2.47)$$

Уравнение (2.31) можно решить численным методом. Погрешность численного решения вычисляется по формуле

$$|V(t) - V_{2n}| \approx \frac{1}{15} \cdot |V_n - V_{2n}| < 0,02\%, \quad (2.48)$$

где  $V(t)$  – точное решение уравнения (2.31);  $V_{2n}$  – численное решение уравнения (2.31) с числом шагов  $2n$ ;  $V_n$  – численное решение уравнения (2.31) с числом шагов  $n$ .

Окончательно получив искомую зависимость  $V(t)$ , из уравнения (2.31) находим ускорение потока жидкости:

$$a(t) = \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\beta l_3} \left( \frac{\Delta P}{\rho} - \frac{V^2}{2} \left( \frac{\mu B(t)}{V\rho d_3} + \xi(t) \right) \right). \quad (2.49)$$

По зависимостям скорости и ускорения потока во времени можно определить другие характеристики РИА.

Энергию импульса давления, генерируемого в канал статора, можно определить по формуле [38]

$$E_n = \frac{\rho S_0^2}{2\pi c} \int_0^{t_1} \left( \frac{dV}{dt} \right)^2 dt, \quad (2.50)$$

где  $t_1 = (a_c + a_p)/\omega R_p$ ;  $c$  – скорость звука в жидкости.

Интенсивность акустического излучения – это энергетическая характеристика излучения, распространяющегося в заданном направлении, в единицу времени через единицу площади. Эта характеристика представляет собой более объемное понятие, чем энергия импульса давления, и показывает мощность импульса давления на переднем фронте волны в рабочей камере аппарата. Параметр интенсивности акустического излучения также удобен для сравнения эффективности РИА с ультразвуковым и другим акустическим оборудованием для интенсификации химико-технологических процессов.

Интенсивность акустического излучения рассчитывается по формуле

$$I = \frac{E_n}{t_1 S_0} = \frac{\rho S_0}{2\pi c t_1} \int_0^{t_1} \left( \frac{dV}{dt} \right)^2 dt. \quad (2.51)$$

### 2.3.2. РАСЧЕТ РАСХОДА ЖИДКОСТИ И МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОСТИ И ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ ПРИ ВРАЩЕНИИ РОТОРА

Методики расчета характеристик и параметров РИА рассматривались в [1 – 13, 22, 38, 39, 43]. Для того чтобы максимально приблизиться к экономическим критериям расчета, рассмотрим, от каких параметров зависят основные капитальные и эксплуатационные затраты на изготовление и функционирование аппарата. Капитальные затраты на изготовление аппарата зависят в основном от геометрических параметров аппарата, точности изготовления и сборки, стоимости материала, комплектующих изделий и т.п. Стоимость материала и комплектующих изделий слабо поддается оптимизации, так как не зависит от проектировщика. Основными параметрами, от которых зависят габариты аппарата в целом и деталей в отдельности, являются: внешний радиус ротора  $R_p$ ; длина канала статора  $l_c$ ; радиус рабочей камеры  $R_k$ ; высота каналов ротора  $h_p$ , статора  $h_c$  и рабочей камеры  $h_k$ . Точность изготовления и сборки зависит от точности изготовления каждой детали и от основных геометрических размеров аппарата, а также от величины зазора между ротором и статором  $\delta$ .

Эксплуатационные затраты для эффективного функционирования аппарата в основном зависят от потребляемой энергии и от энергии, расходуемой на подачу жидкости под давлением в РИА. Текущие технологические и ремонтные затраты во внимание не принимаются. Таким образом, при минимизации капитальных и эксплуатационных затрат следует оптимизировать: потребляемую мощность  $N$ ; расход жидкости  $Q$ ; амплитуду импульсов давления  $P_n(t)$ . При расчете и проектировании РИА необходимо стремиться минимизировать  $N$ , стремиться к наибольшему значению амплитуды  $P_n(t)$ , выдерживать  $Q$  не менее заданного.

Расход жидкости через канал ротора и статора за период их со вмещения рассчитывается по выражению, м<sup>3</sup>/ч [22]:

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

где  $V$  – скорость потока жидкости в канале статора, м/с;  $S$  – площадь, через которую поток жидкости протекает из канала ротора в канал статора, м<sup>2</sup>. Методы определения  $V(t)$  и  $S(t)$  приведены в различной литературе, например в [13, 18, 38, 39, 43, 52].

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

$$t_1 = 2a/(\omega R_p). \quad (2.52)$$

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 [22]

$$Q_2 = \frac{1}{T - t_1} \left( \int_{t_1}^T Q(t) dt \right). \quad (2.53)$$

$$T = \frac{a + b}{\omega R_p}. \quad (2.54)$$

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

$$Q_{\text{ср}} = Q_1 + Q_2. \quad (2.55)$$

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

$$Q_{\text{полн}} = Q_{\text{ср}} z_c. \quad (2.56)$$

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

$$Q_{\text{полн}} = Q_{\text{ср}} z. \quad (2.57)$$

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 в полости ротора без лопаток, а также для расчета расхода жидкости через аппарат умножим  $Q_{\text{полн}}$  на эмпирический коэффициент  $K_0$  и добавим эмпирическую поправочную функцию  $f(\omega R_p, \mu)$ :

$$Q = K_0 Q_{\text{полн}} + f(\omega R_p, \mu). \quad (2.58)$$

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  $\omega$ . 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  $\mu$ .

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, т.е. 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 эмпирических коэффициента  $K_0$  и поправочной функции  $f(\omega, R_p, \mu)$ , влияния параметров угловой скорости и радиуса ротора, а также вязкости жидкости на расход через РИА.

Для экспериментальных исследований технологических характеристик роторных импульсных аппаратов был разработан multifunctional испытательный стенд, технологическая схема которого показана на рис. 2.4.

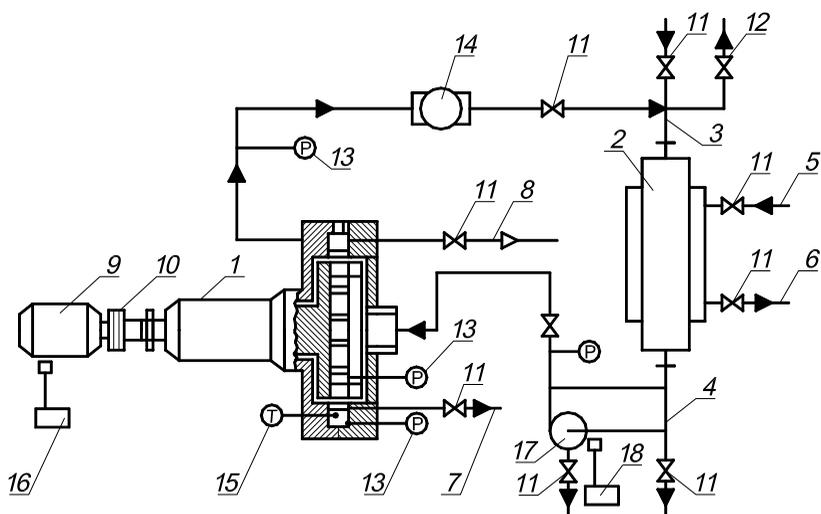


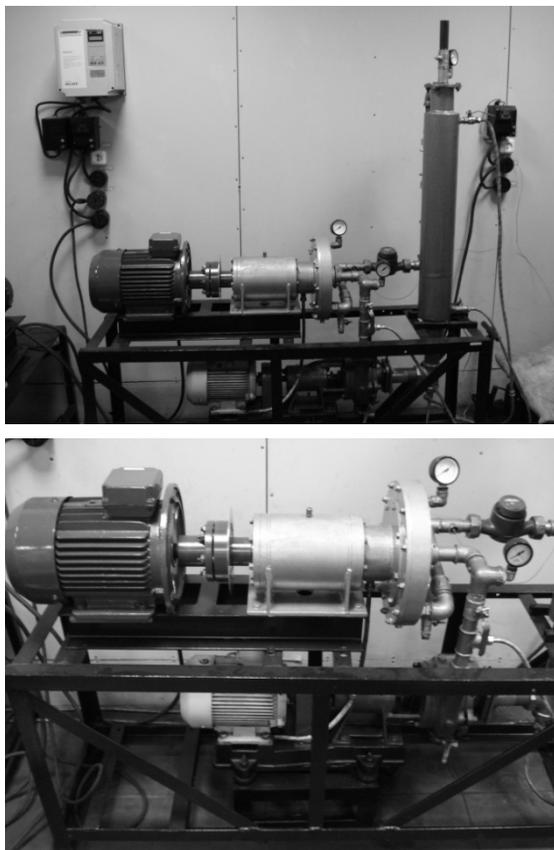
Рис. 2.4. Технологическая схема экспериментального стенда

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; линию 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 с помощью 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 с помощью 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 с помощью частотного преобразователя 18 марки ВЕСПЕР EI-7011-100Н.

Фотографии экспериментального стенда представлены на рис. 2.5.



**Рис. 2.5. Фотографии экспериментального стенда**

Установка работает следующим образом. Модельная жидкость (вода, нефтепродукт, 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 емкости 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.

## 2.4. Параметры роторных импульсных аппаратов

	РИА-150	РИА-200	РИА-250
$a_p$ , мм	2	2	3
$a_c$ , мм	2	2	3
$h_p$ , мм	16	20	50
$b_p$ , мм	22	24	19
$b_c$ , мм	22	24	19
$R_p$ , мм	75	100	125
$\delta$ , мм	0,1	0,1	0,1
$l_p$ , мм	12	12	16
$l_c$ , мм	17	22	25
$z$	18	24	36
$\omega$ , с <sup>-1</sup>	50...450	50...450	50...450
$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	1...7	2...10	5...40
$N$ , кВт	до 5,5	до 11	до 37

В качестве нагнетающего оборудования использовали шестеренчатый насос объемной 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 5 и отвода 6 воды.

Для экспериментальных исследований основных характеристик роторных импульсных аппаратов использовали три типоразмера аппарата, геометрические и режимные параметры которых приведены в табл. 2.4. 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;  $h_p$  – высота ротора, м;  $\delta$  – зазор между ротором и статором, м;  $l_{p,c}$  – длина ротора и статора, м;  $z$  – количество каналов ротора и статора, м;  $\omega$  – угловая скорость, 1/с;  $Q$  – расход, м<sup>3</sup>/с;  $N$  – мощность электродвигателя, Вт.

В соответствии с подходом к расчету потребляемой мощности, предложенным в [6], а также с учетом работ [1, 8] формула для определения мощности может быть записана в виде

$$N = A \operatorname{Re}^B \left( \frac{\delta}{R_p} \right)^{k_1} \left( \frac{az}{R_p} \right)^{k_2} \left( \frac{h_p}{R_p} \right)^{k_3} \omega^3 \rho R_p^4 h_p, \quad (2.59)$$

где  $\operatorname{Re} = \omega R_p^2 \rho / \mu$ ;  $A, B, k_1, k_2, k_3$ .

Критерий  $\operatorname{Re}$  влияет на мощность для преодоления трения в зазоре между ротором и статором и зависит не только от параметров аппарата, но и от вязкости и плотности жидкости.

По данным, приведенным в работе [22], 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.

На основании проведенных исследований расход жидкости через РИА предлагается определять по формуле (2.58):

$$Q = K_0 Q_{\text{полн}} + f(\omega, R_p, \mu).$$

Опытные исследования по влиянию параметров  $z, R_p, \mu$  и  $\omega$  позволили определить коэффициент  $K_0$  и вид функции  $f(\omega, R_p, \mu)$ , в которых числовыми коэффициентами учтена размерность расхода:

$$f(\omega R_p, \mu) = 3,5 \cdot 10^{-4} \omega R_p^3 - 0,02 \omega R_p^2 + 0,25 \omega R_p + 3d_{1,2}; \quad (2.60)$$

$$d_1 = 1 (\mu = 0,001 \dots 0,030 \text{ Па} \cdot \text{с});$$

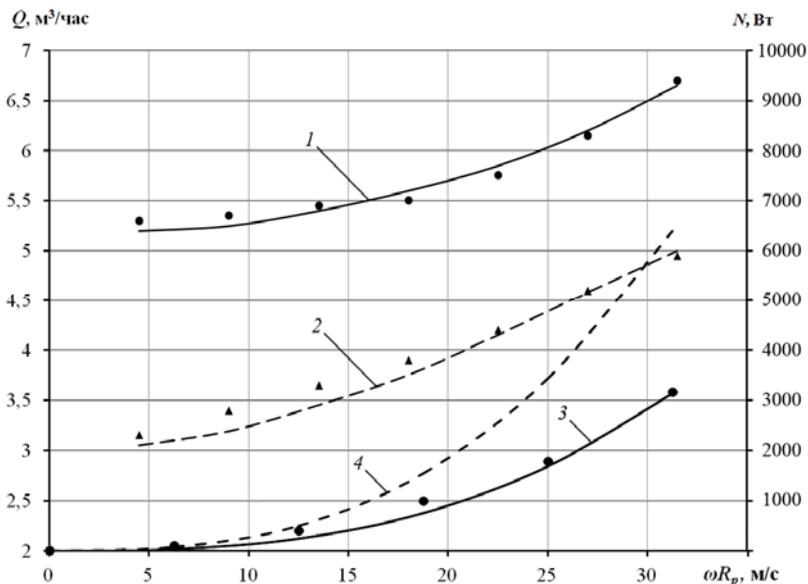
$$d_2 = 0,1 (\mu = 0,031 \dots 0,070 \text{ Па} \cdot \text{с})$$

$$K_0 = 0,16z\omega.$$

На рисунке 2.6. представлен график расчетных и экспериментальных зависимостей расхода жидкости от линейной скорости ротора  $\omega R_p$  с диапазоном давления  $P_{\text{вх}} = P_{\text{ст}} = 0,2 \dots 0,4$  МПа на входе в РИА.

В соответствии с формулой (2.59), уравнение для расчета потребляемой мощности на преодоление сил трения в зазоре между ротором и статором записывается в виде

$$N = \operatorname{Re}^{-0,21} \left( \frac{\delta}{R_p} \right)^{0,2} \left( \frac{az}{R_p} \right)^{0,7} \left( \frac{h_p}{R_p} \right)^{-1,3} \omega^3 \rho R_p^4 h_p. \quad (2.61)$$



**Рис. 2.6. Зависимость расхода жидкости (кривые 1, 2) и потребляемой мощности (кривые 3, 4) от линейной скорости ротора:**

1, 3 – вода ( $\mu = 0,0018$ , Па·с,  $\rho = 1000$ , кг/м<sup>3</sup>);

2, 4 – масло ( $\mu = 0,059$ , Па·с,  $\rho = 930$ , кг/м<sup>3</sup>);

• – экспериментальные данные; — — расчет

Графики зависимости потребляемой мощности от линейной скорости совмещения канала ротора с каналом статора  $\omega R_p$  показаны на рис. 2.6. Коэффициенты в формуле (2.61) получены для жидкостей с параметрами вязкости  $\mu = 0,001...0,03$  Па·с и плотности  $\rho = 850...1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Анализ экспериментальных и расчетных данных с учетом эмпирических коэффициентов показывает их удовлетворительную сходимость. В расчетных данных по затратам мощности не учитываются механические затраты мощности и затраты мощности на преодоление сил трения на других поверхностях ротора кроме поверхности, образующей зону зазора между ротором и статором. Вследствие этого, расчетные данные по затратам мощности на преодоление сил трения в зазоре будут меньше, чем экспериментальные данные с учетом всех затрат мощности на вращение ротора аппарата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2

1. **Балабудкин, М. А.** Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М. А. Балабудкин. – М. : Медицина, 1983. – 160 с.
2. **Кокушкин, О. А.** О расчете мощности ротационных аппаратов / О. А. Кокушкин, А. А. Барам, И. С. Павлушенко // Журнал прикладной химии. – 1969. – Т. 42, № 8. – С. 1793 – 1798.
3. **О гидромеханических** закономерностях работы роторно-пульсационных аппаратов / П. П. Дерко и др. // Теоретические основы химической технологии. – 1973. – Т. 7, № 1. – С. 123 – 125.
4. **Иванец, Г. Е.** Энергетическая характеристика роторно-пульсационного аппарата / Г. Е. Иванец, В. А. Плотников, Т. В. Плотников // Журнал прикладной химии. – 2000 – Т. 73, № 9. – С. 1511 – 1514.
5. **Давыденко, Б. В.** Теплообмен, гидродинамика и процессы диспергирования в роторно-пульсационных и в многогрануляционных аппаратах : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / Б. В. Давыденко. – К., 2009. – 366 с.
6. **Промтов, М. А.** Интенсификация процессов эмульгирования и растворения в аппаратах роторного типа : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / М. А. Промтов. – Тамбов, 1992. – 149 с.
7. **Балабышко, А. М.** Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности / А. М. Балабышко, В. Ф. Юдаев. – М. : Недра, 1992. – 176 с.
8. **Богданов, В. В.** Эффективные малообъемные смесители / В. В. Богданов, Е. И. Христофоров, Б. А. Клоцунг. – Л. : Химия, 1989. – 224 с.
9. **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.
10. **Червяков, В. М.** Определение энергозатрат в роторных аппаратах / В. М. Червяков, А. А. Коптев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 4. – С. 10 – 12.
11. **Червяков, В. М.** Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах / В. М. Червяков, В. Г. Однолько. – М. : Машиностроение, 2008. – 116 с.
12. **Будрик, В. Г.** Создание и исследование роторно-пульсационной установки для производства жидких и пастообразных молочных продуктов : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / В. Г. Будрик. – Москва, 2005. – 191 с.

13. **Промтов, М. А.** Пульсационные аппараты роторного типа: Теория и практика / М. А. Промтов. – М. : Машиностроение, 2001. – 260 с.

14. **Чичева-Филатова, Л. В.** Научные основы интенсификации химико-технологических процессов в роторных аппаратах с модуляцией потока и их применение в пищевом производстве / Л. В. Чичева-Филатова ; под ред. В. Ф. Юдаева. – М. : Пищевая промышленность, 2005. – 208 с.

15. **Николаев, Е. А.** Разработка методов расчета и моделирование малообъемных роторных дезинтеграторов-смесителей : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Е. А. Николаев. – Уфа, 2008. – 117 с.

16. **Биглер, В. И.** Нестационарные истечения реальной жидкости через отверстия гидродинамической сирены / В. И. Биглер, В. Ф. Юдаев // Акустический журнал. – 1978. – № 2. – С. 289 – 291.

17. **Звездин, А. К.** Использование аппаратов типа РАМП для получения высокодисперсных эмульсий в режиме акустической кавитации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / А. К. Звездин. – М., 1983. – 16 с.

18. **Юдаев, В. Ф.** Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды / В. Ф. Юдаев // Теоретические основы химической технологии. – 1994. – Т. 28, № 6. – С. 581 – 590.

19. **Балабудкин, М. А.** О закономерностях гидромеханических явлений в роторно-пульсационных аппаратах / М. А. Балабудкин // Теоретические основы химической технологии. – 1975. – Т. 9, № 5. – С. 783 – 788.

20. **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.

21. **Константинов, Б. П.** Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченной среде / Б. П. Константинов. – М.–Л. : Наука, 1977. – 144 с.

22. **Промтов, М. А.** Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа / М. А. Промтов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 9. – С. 13 – 15.

23. **Римский-Корсаков, А. В.** Электроакустика / А. В. Римский-Корсаков. – М. : Связь, 1973. – 272 с.

24. **Юдаев, В. Ф.** Истечение газожидкостной смеси через отверстия ротора и статора сирены / В. Ф. Юдаев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1985. – № 12. – С. 60 – 66.

25. **Альтшуль, А. Д.** Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М. : Недра, 1982. – 224 с.

26. **Биглер, В. И.** Исследование течений в аппарате типа динамической сирены и его применение для процесса растворения : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. И. Биглер. – М. : МИХМ, 1979. – 16 с.

27. **Попов, Д. Н.** Нестационарные гидромеханические процессы / Д. Н. Попов. – М. : Машиностроение, 1982. – 240 с.

28. **Promptov, M.** Experimental Study of Pulsed Acoustic Cavitation in the Hydrodynamic-Siren Type Pulser / M. Promptov // Acoustical Physics. – 1997. – V. 43, N 4. – P. 488 – 491.

29. **Yoshikawa, S.** Hydrodynamic siren as a broad band under water sound projector / S. Yoshikawa, K. Koyano // J. Acoust. Soc. Am. – 1995. – V. 98, N 2. – P. 1047 – 1056.

30. **Басок, Б. И.** Оборудование для получения и обработки высоковязких дисперсных сред / Б. И. Басок, А. П. Гартвиг, А. Р. Коба, О. А. Горячева // Тепломассообмен в технологических процессах (теплотехнология). Промышленная теплотехника. – 1996. – Т. 18, № 1. – С. 50 – 56.

31. **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1975. – 464 с.

32. **Биглер, В. И.** Возбуждение кавитаций в аппаратах типа гидродинамической сирены / В. И. Биглер, В. Н. Лавренчик, В. Ф. Юдаев // Акустический журнал. – 1978. – Т. 24, № 1. – С. 34 – 39.

33. **Чугаев, Р. Р.** Гидравлика / Р. Р. Чугаев. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 672 с.

34. **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.

35. **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.

36. **Математические** методы в механике прерывистых течений / под ред. А. И. Зиминой // Межвуз. сб. науч. ст. – СПб. : Технопанорама, 1999. – 56 с.

37. **Юдаев, В. Ф.** Исследование гидродинамической сирены / В. Ф. Юдаев, Д. Т. Кокорев // Теоретические основы химической технологии. – 1969. – № 10. – С. 72 – 77.
38. **Зимин, А. И.** Прикладная механика прерывистых течений / А. И. Зимин. – М. : Фолиант, 1997. – 308 с.
39. **Гидродинамика**, теплообмен и эффекты дробления во вращательно-пульсирующих потоках / Б. И. Басок, Б. В. Давыденко, А. А. Авраменко, И. А. Пироженко. – К. : ЕКСПРЕС, 2012. – 296 с.
40. **Червяков, В. М.** Нестационарное течение идеальной сжимаемой среды в каналах роторного аппарата / В. М. Червяков, Ю. В. Воробьев // Теоретические основы химической технологии. – 2005. – Т. 39, № 1. – С. 65 – 71.
41. **Корякин, В. Е.** Численное моделирование нестационарных движений вязкой жидкости в поворотных каналах / В. Е. Корякин, Ю. Е. Карякин, А. Я. Нестеров // Инж.-физ. журн. – 1988. – Т. 54, № 1. – С. 25 – 32.
42. **Cooke, M.** Power Consumption Characteristics of an In-Line Silverson High Shear Mixer / M. Cooke, T. L. Rodgers A. J. Kowalski // AIChE Journal. – 2011. – V. 66. – P. 2068 – 2079.
43. **Балабышко, А. М.** Гидромеханическое диспергирование / А. М. Балабышко, А. И. Зимин, В. П. Ружицкий. – М. : Наука, 1998. – 331 с.
44. **Droplet Break-up by In-line Silverson Rotor–Stator Mixer** / S. Hall, M. Cooke, A. El-Hamouz, A. J. Kowalski // Chemical Engineering Science. – 2011. – V. 66, N 66. – P. 2068 – 2079.
45. **Юдаев, В. Ф.** Исследование гидродинамического аппарата сиренного типа и его использование для интенсификации технологических процессов в гетерогенных системах : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Ф. Юдаев. – М., 1970.
46. **Сопин, А. И.** Исследование параметров гидродинамической сирены с целью получения высокодисперсных гетерогенных сред : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. И. Сопин. – М., 1975. – 16 с.
47. **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).
48. **Скучик, Е.** Основы акустики / Е. Скучик. – М. : Мир, 1976. – Т. 1. – 520 с.

49. **Справочник** по технической акустике / пер. с нем. ; под ред. М. Хекла и Х. А. Мюллера. – Л. : Судостроение. – 1980. – 440 с.

50. **Монастырский, М. В.** Интенсификация процессов диспергирования и экстрагирования в роторном импульсно-кавитационном аппарате : дис. ... канд. техн. наук : 05. 17. 08 / М. В. Монастырский. – Тамбов, 2003. – 178 с.

51. **Промтов, М. А.** Модель течения жидкости через прерыватель одноступенчатого роторно-импульсного аппарата / М. А. Промтов, А. И. Зимин, М. В. Монастырский // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23, № 1–2. – С. 129 – 133.

52. **Давыденко, Б. В.** Теплообмен, гидродинамика и процессы диспергирования в роторно-пульсационных и в многогрануляционных аппаратах : дис. ... канд. техн. наук : 05. 14. 06 / Б. В. Давыденко. – К., 2009. – 366 с.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА

---

#### 3.1. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ЖИДКОСТИ В РИА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Математическая модель, базирующаяся на нестационарном уравнении Бернулли (2.31), отображающая закономерности гидромеханических процессов в канале статора РИА, описана в работах [1 – 5]. Нелинейные дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами, как правило, решают с применением численных методов.

Из большого числа методов численного решения дифференциальных уравнений можно отметить две обширные группы [6]. К первой группе относятся одношаговые методы. В данных методах для поиска последующего значения точки на кривой  $y = y(x)$  необходима информация только об одном предыдущем шаге. К таким численным методам относятся методы Рунге–Кутты, Эйлера. Вторая группа – многошаговые методы (методы прогноза и коррекции), в которых для поиска следующего значения точки на кривой  $y = y(x)$  необходима информация более чем об одной из предшествующих точек. К таким методам относятся методы Хемминга, Милна, Адамса.

Рассмотрим дифференциальное уравнение  $y' = f(x, y)$  с начальным условием  $y(x_0) = y_0$ .

Одними из эффективных и применяемых численных методов решения дифференциальных уравнений являются методы Рунге–Кутты.

На каждом шаге функция  $y(x)$  раскладывается в многочлен с заданной точностью, полученный из ряда Тейлора:

$$y(x_i + n) = y(x_i) + ny'(x_i) + n^2/2! \cdot y''(x_i) + n^3/3! \cdot y'''(x_i) + \\ + n^4/4! \cdot y^{(4)}(x_i) + n^5/4! \cdot y^{(5)}(x_i) + \dots, \quad (3.1)$$

где  $n$  – величина шага интегрирования дифференциального уравнения.

Рунге К. и Кутта М. В. получали различные методы для определения в каждой узловой точке значений функции  $y(x)$ , урезая ряд Тейлора в различных точках и отбрасывая правые члены ряда. Точность каждого метода определяется отброшенными членами ряда.

Изначально методом Рунге–Кутты является исправленный и модифицированный метод Эйлера, который считается схемой второго

порядка точности. Существуют стандартные схемы третьего порядка точности, но они применяются достаточно редко. Из всех численных методов решения дифференциальных уравнений на ЭВМ наибольшее распространение получила стандартная схема четвертого порядка. Она реализована в различных математических пакетах (Maple, MathCAD), так как обеспечивает высокую точность и в то же время отличается сравнительной простотой. Поэтому в большинстве случаев он упоминается в литературе просто как «метод Рунге–Кутты» без указания его порядка. Редко при необходимости расчетов с повышенной точностью используются схемы пятого и шестого порядков [7, 8]. Построение схем более высокого порядка сопряжено с большими вычислительными трудностями [9].

В методе Рунге–Кутты четвертого порядка искомая функция  $y(x)$  аппроксимируется рядом Тейлора на любом шаге интегрирования дифференциальных уравнений, содержащим члены ряда с  $n^4$  [6]:

$$y(x_i + n) = y(x_i) + ny'(x_i) + n^2/2! \cdot y''(x_i) + n^3/3! \cdot y'''(x_i) + n^4/4! \cdot y^{(4)}(x_i).$$

В итоге ошибка на любом шаге обладает порядком  $n^5$ . Если необходимо сохранить члены ряда Тейлора, содержащие  $n^2$ ,  $n^3$ ,  $n^4$ , необходимо определить вторую  $y''$ , третью  $y'''$  и четвертую  $y^{(4)}$  производные функции  $y(x)$ . Эти производные аппроксимируются разделенными разностями второго, третьего и четвертого порядков соответственно.

Этот метод имеет четвертый порядок точности, т.е. суммарная ошибка на конечном интервале интегрирования имеет порядок  $O(n^4)$  (ошибка на каждом шаге порядка  $O(n^5)$ ).

В итоге для вычисления значения функции  $y_{i+1}$  по методу Рунге–Кутты необходима следующая последовательность действий [10]:

1. Значение в следующих точках кривой находится по формуле

$$y_{i+1} = y_i + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)/6.$$

2. Вычисление нового значения проходит в четыре стадии:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_i, y_i); \\ k_2 &= hf(x_i + n/2, y_i + k_1/2); \\ k_3 &= hf(x_i + n/2, y_i + k_2/2); \\ k_4 &= hf(x_i + n/2, y_i + k_3). \end{aligned}$$

Блок-схему алгоритма метода Рунге–Кутты можно составить в виде основной программы и подпрограммы (метод Рунге–Кутты четвертого порядка), которые изображены на рис. 3.1 [10].

Основная программа

Подпрограмма Rk4

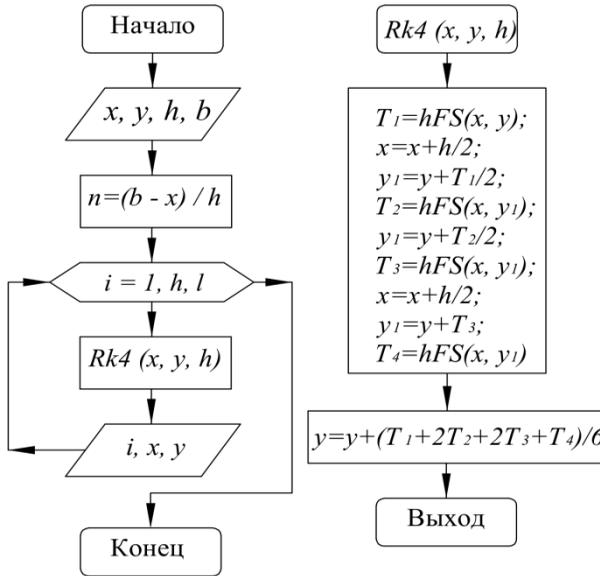


Рис. 3.1. Схема алгоритма метода Рунге–Кутты четвертого порядка

Математическая модель течения жидкости, форма и параметры импульсного давления, генерируемого в канал статора за период времени  $t_1 = [0, 2a/\omega R_p]$ , описывается уравнениями, рассмотренными в главе 2:

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

$$P_n(t) = \rho \frac{dV}{dt} \left( \frac{S_0}{2\pi} \right)^{0,5};$$

$$\beta l \frac{dV}{dt} + \lambda(t) \frac{lV^2}{2d_3} + \xi(t) \frac{V^2}{2} + \frac{B(t)vV}{2d_3} = \frac{\Delta P}{\rho}.$$

Мощность, расходуемая на вращения ротора РИА, определяется по формуле

$$N = A \text{Re}^B \left( \frac{\delta}{R_p} \right)^{0,2} \left( \frac{az}{R_p} \right)^{0,7} \omega^3 \rho R_p^4 h_p.$$

В качестве начальных условий принимаются равенства (2.39) – (2.45), рассмотренные в разделе 2.3.

В качестве входных принимаются следующие параметры.

1. Параметры обрабатываемой среды:

$\mu = 0,001 \dots 0,070$  Па·с – коэффициент динамической вязкости жидкости;

$\rho = 600 \dots 2000$  кг/м<sup>3</sup> – плотность жидкости;

$t, ^\circ\text{C}$  – температура обрабатываемой жидкости;

$P_{\text{н.п}}$ , Па – давление насыщенного пара жидкости при температуре  $t$ .

2. Конструктивные параметры РИА:

$\delta = 5 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-4}$  м – зазор между ротором и статором;

$a_p = 0,001 \dots 0,003$  м – ширина канала ротора;

$a_c = 0,001 \dots 0,003$  м – ширина канала статора;

$H = 0,01 \dots 0,03$  м – высота каналов;

$R_p = 0,075 \dots 0,150$  м – радиус ротора;

$l_p = 0,01 \dots 0,03$  м – длина канала ротора;

$l_c = 0,01 \dots 0,03$  м – длина канала статора;

$z = 20 \dots 36$  – количество каналов в роторе и статоре.

3. Режимные параметры РИА:

$\omega = 50 \dots 450$  рад/с – угловая скорость вращения ротора;

$P = 5 \cdot 10^4 \dots 4 \cdot 10^5$  Па – статическое давление (давление на входе в полость ротора).

На основании математической модели можно составить схему входных и выходных параметров системы (рис. 3.2), блок-схему основного алгоритма программы для расчета характеристик РИА (рис. 3.3).

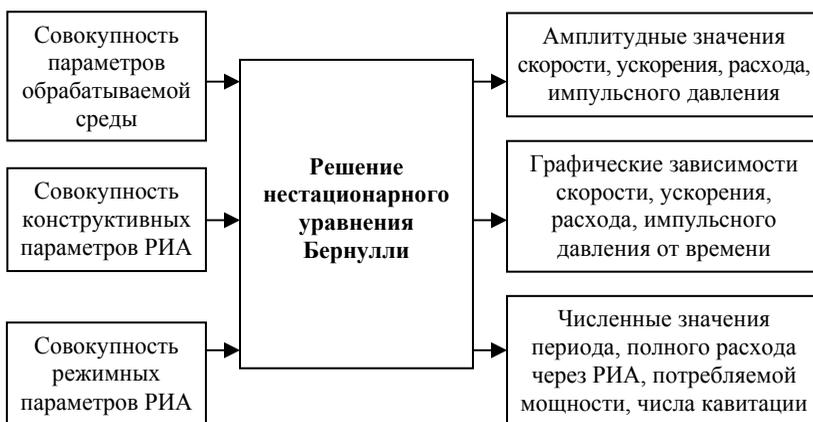
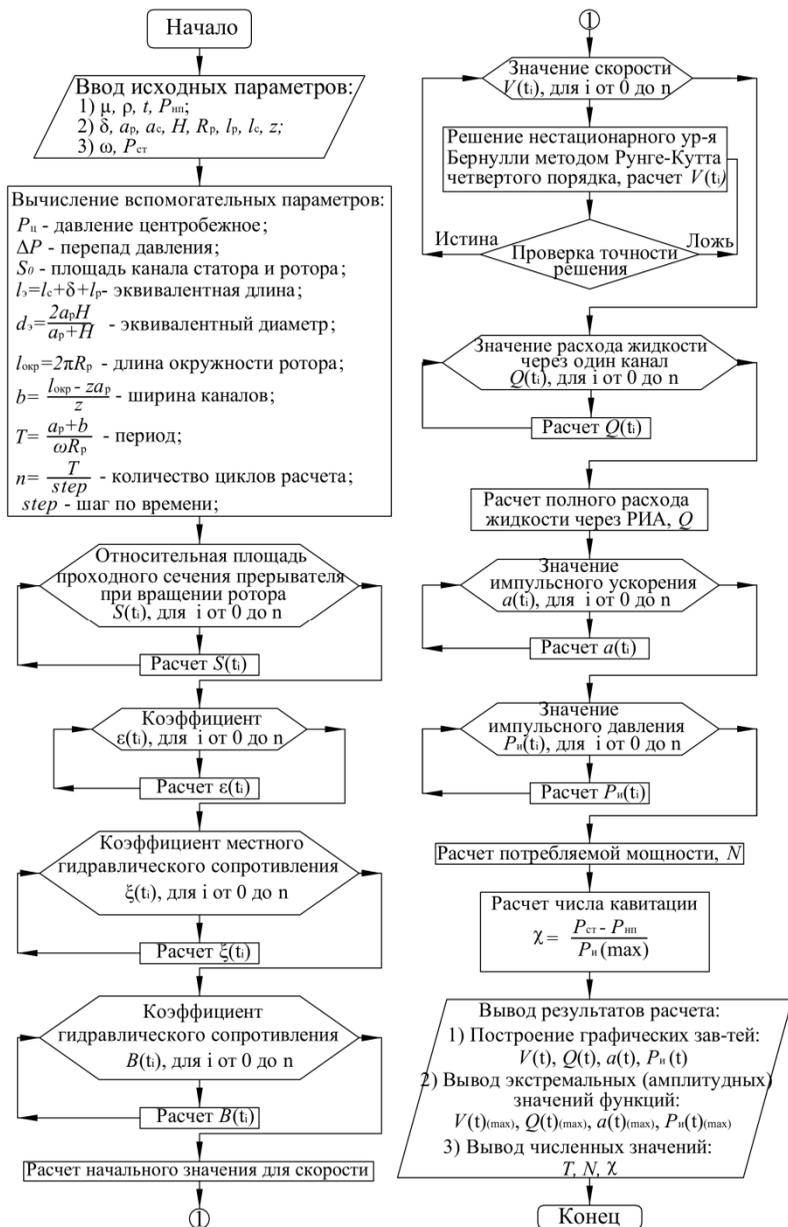


Рис. 3.2. Схема входных и выходных параметров системы



**Рис. 3.3. Блок-схема алгоритма программы для расчета характеристик РИА**

Рассмотренная математическая модель и алгоритм расчета характеристик РИА реализованы в программном продукте «Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа» [11]. Данный программный продукт создан на базе приложения Microsoft Visual Basic 6.0 [12].

Microsoft Visual Basic – средство разработки программного обеспечения, разрабатываемое корпорацией Microsoft и включающее язык программирования и среду разработки. Visual Basic сочетает в себе процедуры и элементы объектно-ориентированных и компонентно-ориентированных языков программирования. Среда разработки Visual Basic включает инструменты для визуального конструирования пользовательского интерфейса [13 – 15].

Visual Basic считается хорошим средством быстрой разработки прототипов программ, для разработки приложений баз данных и вообще для компонентного способа создания программ, работающих под управлением операционных систем семейства Microsoft Windows.

Интерфейс программы «Расчет основных характеристик РИА радиального типа» представлен на рис. 3.4.

В левой части окна находится:

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

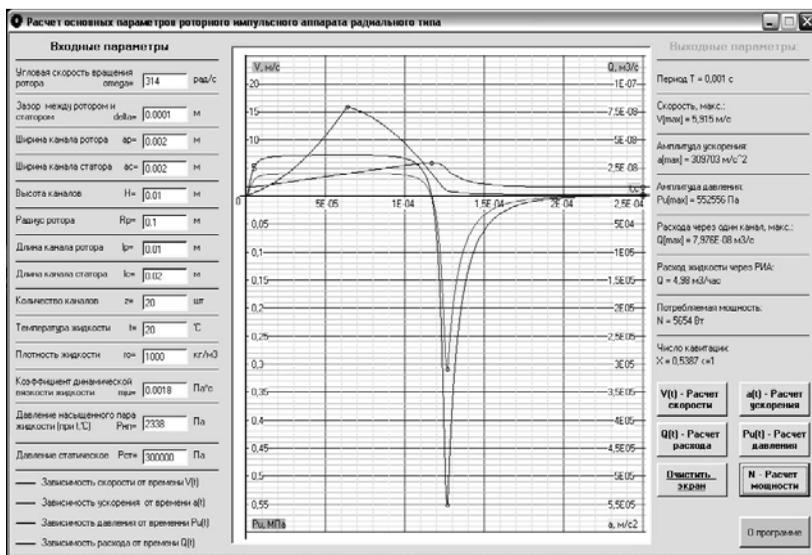


Рис. 3.4. Интерфейс программы расчета основных характеристик РИА

Входные параметры	
Угловая скорость вращения ротора	$\omega =$ <input type="text"/> рад/с
Зазор статора	Диапазон значений <input type="text"/> 50-450 рад/с м
Ширина канала ротора	$a_r =$ <input type="text"/> м
Ширина канала статора	$a_s =$ <input type="text"/> м

**Рис. 3.5. Ввод численных значений параметров**

При наведении курсора на название вводимого параметра выводится подсказка о диапазоне допустимых значений параметра (рис. 3.5).

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 четыре шкалы:

- 1) в левом верхнем углу – шкала скорости с ценой деления 1 м/с;
- 2) в правом верхнем углу – шкала расхода с ценой деления  $5 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/с;
- 3) в правом нижнем углу – шкала ускорения с ценой деления  $1 \cdot 10^4$  м/с<sup>2</sup>;
- 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. 3.6).

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.

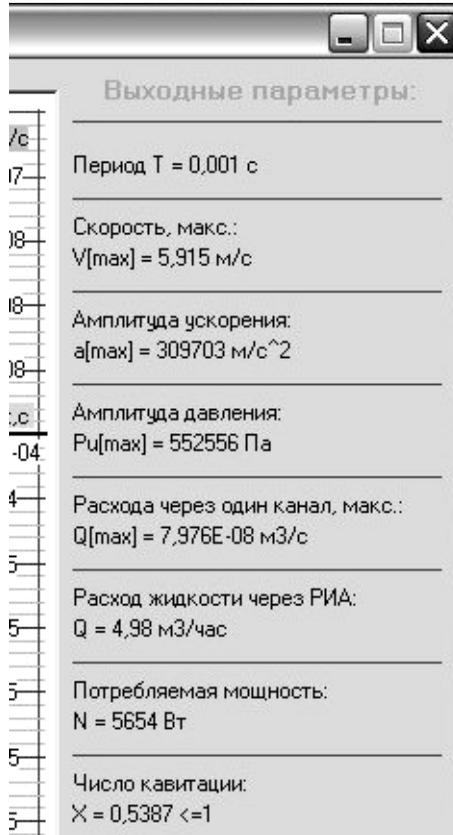


Рис. 3.6. Вывод численных значений результатов расчета

На основе данных по давлению в потоке жидкости можно определить число импульсной кавитации по формуле [1, 2]

$$\chi = \frac{P_c - P_{н.п.}}{P_m}, \quad (3.2)$$

где  $P_c$  – давление в канале статора, Па;  $P_{н.п.}$  – давление насыщенных паров обрабатываемой жидкости, Па.

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

Кнопки управления расположены справа в нижнем углу (рис. 3.7).



Рис. 3.7. 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 также 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 [12].

Недостатком численного метода решения уравнения Бернулли (2.31) является определение значений скорости и ускорения для одной условно осредненной точки пространства – точка на средней оси канала статора между ротором и статором при  $\delta \rightarrow 0$  [1, 3, 16].

### 3.2. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ ANSYS

Более точно по сравнению с нестационарным уравнением Бернулли движение потока жидкости в каналах ротора и статора описывает трехмерное уравнение Навье–Стокса совместно с уравнением неразрывности для несжимаемой жидкости:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \end{array} \right. \quad (3.3)$$

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

Сложность гидромеханических процессов не позволяет использовать уравнение Навье–Стокса для нахождения кинематических и динамических характеристик потока жидкости ( $V_x = V_x(x, y, z, t)$ ,  $V_y = V_y(x, y, z, t)$ ,  $V_z = V_z(x, y, z, t)$ ,  $P = P(x, y, z, t)$ ) в каналах ротора и статора РИА, так как 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. Особую трудность вызывает то, что одна из границ (поверхность стенки ротора и выходной периметр канала ротора) подвижна. Необходимо применение простых моделей течения жидкости, описывающих с достаточной точностью законы движения потока рабочей среды.

Совершенствование ЭВМ сделало доступным численное моделирование трехмерного течения на основе полной системы уравнений Навье–Стокса. В настоящее время для моделирования турбулентных течений, реализующихся в большинстве практических приложений, наиболее широко распространенной методикой является применение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, дополняемых той или иной моделью турбулентности. Имеется обширная литература по предсказательным возможностям RANS-моделей турбулентности применительно к двумерным течениям, для которых в настоящее время относительно легко обеспечить сходимость решения по сетке. Однако для трехмерных турбулентных течений, и особенно для тех, которые характеризуются сложной геометрией и многовихревой структурой, получение сеточно-независящих численных решений представляет сложную задачу.

Для решения системы дифференциальных уравнений (3.3) использовали программный продукт на основе конечно-элементного анализа – ANSYS CFX компании ANSYS Inc. Комплекс ANSYS CFX – это универсальная программная система конечно-элементного анализа, работающая на основе геометрического ядра Parasolid. Модуль ANSYS CFX использует вычислительный блок по давлению, что позволяет применять эти продукты для решения широкого круга инженерных задач. ANSYS CFX предназначен для моделирования ламинарного и турбулентного течения ньютоновских и неньютоновских сред как однофазных, так и многофазных потоков, на дозвуковых, так и на сверхзвуковых режимах. ANSYS CFX полностью встроено в расчетную среду ANSYS Workbench – графическую оболочку, в которую интегрированы все расчетные модули и инженерные инструменты компании ANSYS [17].

Модуль ANSYS CFX использует для расчетов сетку конечных элементов (числовые значения в узлах сетки) и формирует уравнения для конечных объемов, обеспечивающие сохранение значений потока, что является необходимым условием для точных решений задач гидродинамики. В ANSYS CFX вычисления базируются на основных уравнениях движения, основной акцент сделан на вычисление основных уравнений движения (сопряженная алгебраическая сетка) [18].

ANSYS CFX предоставляет возможность проводить моделирование на комбинированных сетках, которые могут генерироваться из различных типов элементов: тетраэдров, гексаэдров и подобных.

При расчетах в ANSYS CFX стационарных процессов ход итерации по времени оканчивается при достижении заданной оператором степени сходимости. Для моделирования переходного процесса итерационная процедура создает цикл для нелинейных коэффициентов на каждом временном шаге, в то время как основной цикл подходит к концу вычислений по времени.

Конструирование оптимальной расчетной сетки является сложным процессом, итог которого непосредственно влияет на точность расчета. При генерировании сетки в ANSYS CFX пользователь может выбрать сам инструменты для решения данной задачи. CFX позволяет импортировать ранее созданные сетки из сторонних программных продуктов, формат данных которых рекомендован CFX к использованию, также возможно импортировать сетку через нейтральный формат.

В CFX возможно оперировать гексагональной и тетраэдральной сетками различной степени детализации и адаптации. Кроме того, преду-

смотрена возможность с целью сокращения сходимости и времени расчета интерполировать итоги расчетов с грубой сетки на более точную [19].

В физическом препроцессоре CFX-Pre задачами являются импортирование сетки конечных элементов, выбор вида задачи, назначение среды и расчетных областей моделирования, выбор модели турбулентности и задание начальных и граничных условий.

Инструменты CFX-Pre позволяют работать с элементами сборки и комбинировать их между собой различными способами – объединять в группы для задания общих граничных условий, разъединять на несколько расчетных областей для задания различной модели взаимодействия, а также назначать элементам различные свойства.

Для стандартизации ввода в выбранных приложениях CFX-Pre позволяет оператору комбинировать панели графического интерфейса. В CFX-Pre при описании гидродинамических переменных, физических величин и авторских моделей материалов предусмотрена возможность подключать дополнительные зависимости и функции, используя язык программирования, поддерживаемый ANSYS.

Данные особенности препроцессора позволяют эффективно и рационально управлять назначением расчетных областей и физических моделей, конфигурацией начальных и граничных условий.

Алгебраический многосеточный решатель CFX-Solver в CFX позволяет максимально эффективно оперировать процессом расчета. Обладая масштабируемостью, CFX-Solver имеет возможность проведения параллельных расчетов. В решателе CFX все рассчитываемые физические модели работают параллельно.

Анализ и обработка результатов, полученных после вычислений CFX-Solver, происходит в ANSYS CFD-Post. Задачей постпроцессора CFD-Post является визуализация гидродинамических переменных и величин в объеме расчетной области и на поверхностях геометрической модели.

CFD-Post владеет обширными возможностями по визуализации, в том числе, может использовать графическую библиотеку OpenGL. В CFD-Post возможно визуализировать любую величину, использующуюся в процессе расчета, применяя определенные методики:

- градиентная заливка;
- изоповерхности переменных;
- изолинии переменных;
- график изменения переменной в декартовой системе координат вдоль выбранной траектории;
- траектории частиц.

В дальнейшем можно экспортировать полученные данные для дальнейшей обработки и анализа во внешние форматы данных [18].

С программой ANSYS можно взаимодействовать с помощью двух основных способов:

1) заданием текстовых команд на языке программирования, поддерживаемом ANSYS через командную строку;

2) посредством меню графического пользовательского интерфейса.

При использовании первого способа текстовые команды комплекса ANSYS и их параметры вводятся оператором в текстовом виде. Команды ANSYS состоят из имени команды и списка параметров. Имя команды идет первым, вслед за ним указываются параметры, разделенные запятыми.

При работе с графическим интерфейсом оператор может выбирать команды из меню модулей, а вводить параметры посредством диалоговых окон. При использовании с графического интерфейса ANSYS позволяет вводить команды и их параметры с помощью командной строки. Обычно данные способы взаимодействия с программным комплексом ANSYS с успехом дополняют друг друга. Фактически для каждой команды ANSYS имеется соответствующий пункт меню [21].

Комплекс ANSYS позволяет создавать непосредственно сетку конечных элементов (т.е. узлы и элементы), а также геометрическую модель, на основе которой далее создается сетка конечных элементов [21].

Геометрическая модель или ранее созданная сетка также могут импортироваться в среду комплекса ANSYS из внешних файлов [22].

В связи с развитием и широким распространением средств CAD наиболее удобным вариантом создания расчетных моделей является импорт ранее созданных файлов, который может применяться в инженерной практике [18].

В среде модуля ANSYS CFX распространенная последовательность действий при расчете модели сводится к следующим шагам:

- импорт или создание геометрической модели;
- подбор используемых типов конечных элементов, выбор или ввод данных материалов геометрических характеристик;
- создание и генерация расчетной сетки конечных элементов;
- задание опций проведения расчета и граничных условий;
- выполнение расчета с помощью решателя ANSYS CFX ;
- анализ результатов [23].

На рисунке 3.8 представлен упрощенный алгоритм расчета течения потока жидкости в среде ANSYS.



Рис. 3.8. Алгоритм расчета течения потока жидкости в среде ANSYS

Для расчета потока в ANSYS необходимо создание геометрической 3D-модели. На основе 3D модели формируется сетка конечных элементов для каждого элемента ротора и статора.

При моделировании использовались RANS-модели турбулентности:  $k-\omega$  и SST.

Первым шагом при постановке граничных условий в ANSYS CFX является настройка параметров рабочей среды. Далее, на входе в расчетную область может задаваться полное давление (сумма статического и динамического напоров), а на выходе – массовый расход рабочей жидкости. Или на входе задается массовый расход рабочей жидкости, а на выходе задается статическое давление. На границах между ротором и статором ставилось условие периодичности.

В расчетах использовались сетки, составленные из гексаэдрических элементов и тетраэдрических элементов сетки. Структура и качество расчетных сеток были выработаны в результате весьма подробных и систематических методических исследований с оптимальным размером по точности и времени.

Так как с программой ANSYS можно взаимодействовать с помощью графического интерфейса и создания текстовых заданий через командную строку, то это позволяет получить численные значения скоростей и давления в объеме каналов аппарата с помощью специально разработанной подпрограммы. Для корректного решения уравнения Бернулли необходимо получить среднее значение скорости потока в канале статора за период его совмещения с каналом ротора. Для этого надо задать сечения поля скорости на входе в канал статора, с которых по точкам извлекаются значения скорости. С помощью подпрограммы значения скорости в точках усредняются и определяется средняя величина скорости потока жидкости.

Расчет в ANSYS CFX 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, КОМПАС-3D, SolidWorks, T-Flex CAD и др.

Основные требования к создаваемой модели:

- модель должна обладать некоторым внутренним объемом, т.е. представлять собой некоторую твердотельную область пространства с ненулевым объемом, но не объект, образованный какой-либо поверхностью (оболочкой) с нулевой толщиной;

– модель должна быть в соответствующем формате, адаптивном для среды ANSYS, т.е. 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 с помощью программы CADFix.

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

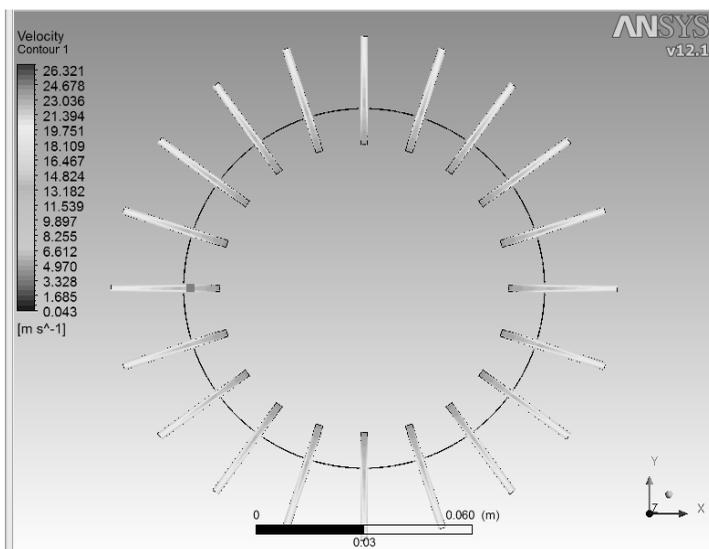
В программном продукте ANSYS CFX был произведен расчет скорости и давления жидкости в области пространства, ограниченной трехмерной моделью внутреннего объема РИА. Задача решалась для следующих условий:

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

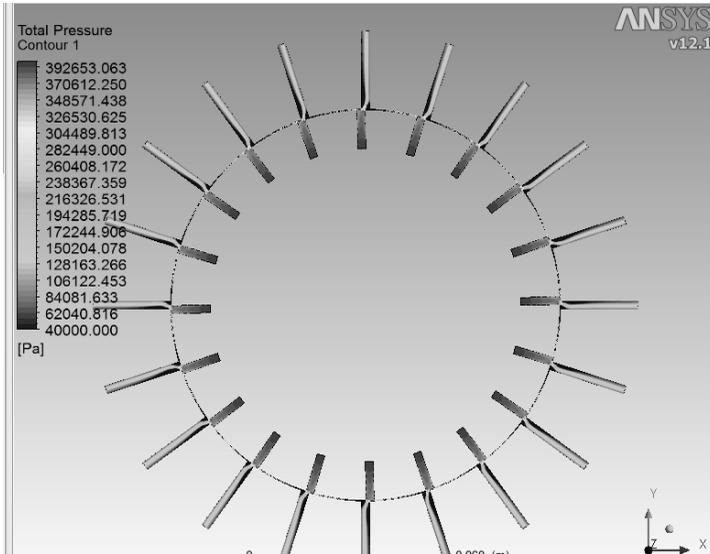
$P_p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$  – давление на входе в канал ротора;

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

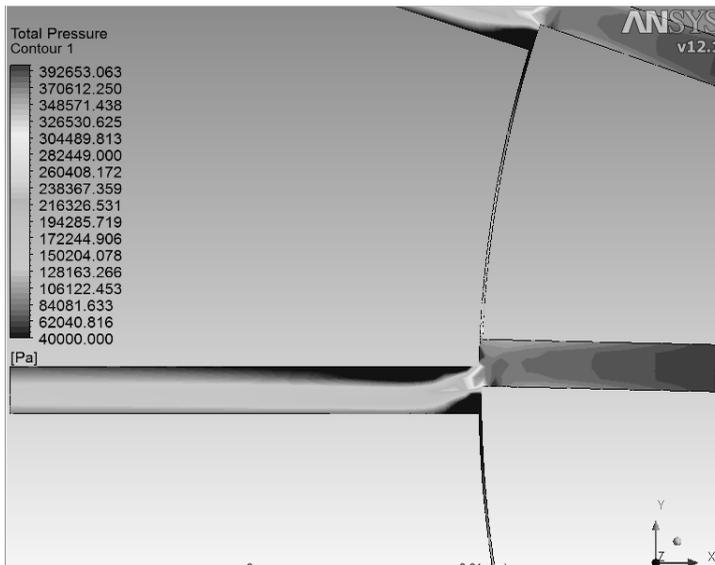
На рисунках 3.9 – 3.11 представлены примеры результата расчета полей скорости и давления в каналах ротора и статора РИА.



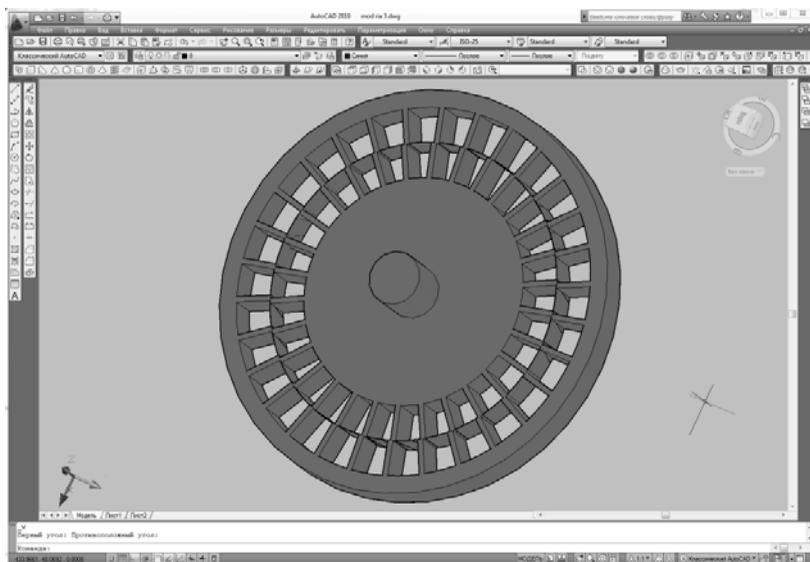
**Рис. 3.9. Поле скоростей в каналах ротора и статора при их полном совмещении**



**Рис. 3.10. Поле давления в каналах ротора и статора при их частичном совмещении**



**Рис. 3.11. Поле давления в канале ротора и канале статора при их частичном совмещении**



**Рис. 3.12. Трехмерная модель внутреннего объема для расчета**

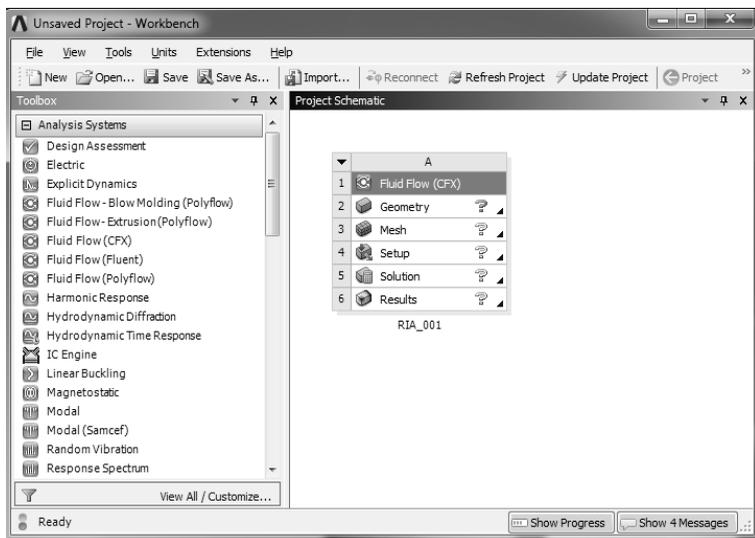
Рассмотрим алгоритм расчета полей скорости и давления РИА в программном продукте ANSYS. Для этого необходимо создать 3D-модель внутреннего объема роторного импульсного аппарата в программной среде Autodesk AutoCAD (рис. 3.12) в масштабе 1:1 (основные единицы измерения в миллиметрах) и сохранить ее в формате \*.sat.

В данной модели величина зазора между ротором и статором имеет значение 0,1 мм и модель полностью соответствует вышеуказанным требованиям.

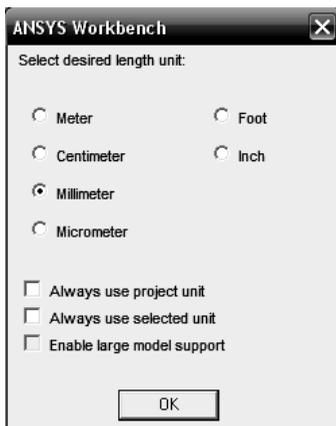
После создания модели приступаем ко второму этапу расчета.

Запускаем программу ANSYS. В открывшемся ANSYS Workbench окне в левом верхнем углу выбираем из списка Analysis Systems шаблон для расчета турбулентных течений жидкости Fluid Flow (CFX) (рис. 3.13).

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 расчет. Далее выбираем единицы измерения геометрической модели (рис. 3.14).



**Рис. 3.13. Основное окно программы ANSYS Workbench**



**Рис. 3.14. Выбор единиц измерения геометрической модели**

В программном продукте Autodesk AutoCAD 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 – ширинам канала ротора;

$a_c = 0,002$  м – ширинам 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;

$z = 20$  – количество каналов в роторе и статоре.

В появившемся окне нажимаем кнопку Generate, далее происходит загрузка исследуемой модели в среду программы ANSYS CFX.

Возвращаемся к основному окну программы рис. 3.13, выбираем следующий пункт расчета – Mesh.

Последовательность этапов создания расчетной сетки:

1. Загрузка сгенерированной модели.
2. Выбор базовой структуры поверхностей и сетки.
3. Генерация предварительной сетки.
4. Оценка качества предварительной сетки. При необходимости операции 1 – 4 повторяются.
5. Создание окончательной сетки.

В открывшемся окне выбираем размер ячейки сетки (рис. 3.15). Нажимаем кнопку Generate Mesh, происходит построение сетки в данном объеме (рис. 3.16). Нажимаем кнопку Update.

Возвращаемся к основному окну программы рис. 3.13, выбираем следующий пункт расчета – Setup. Здесь, в CFX-Pre, происходит задание граничных условий, материалов и пр.

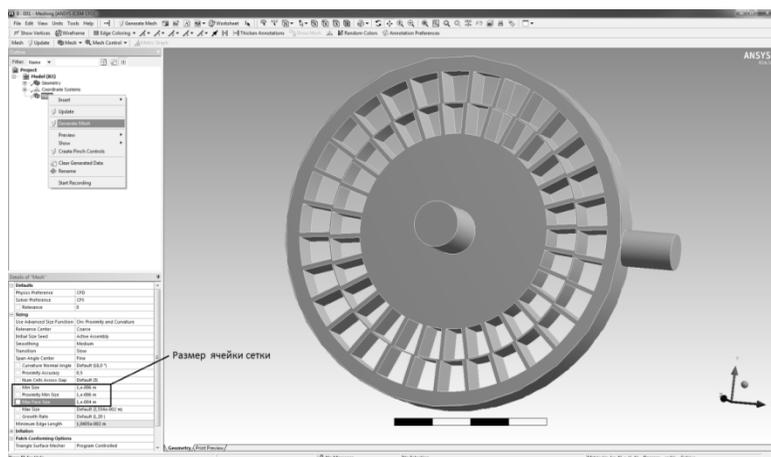
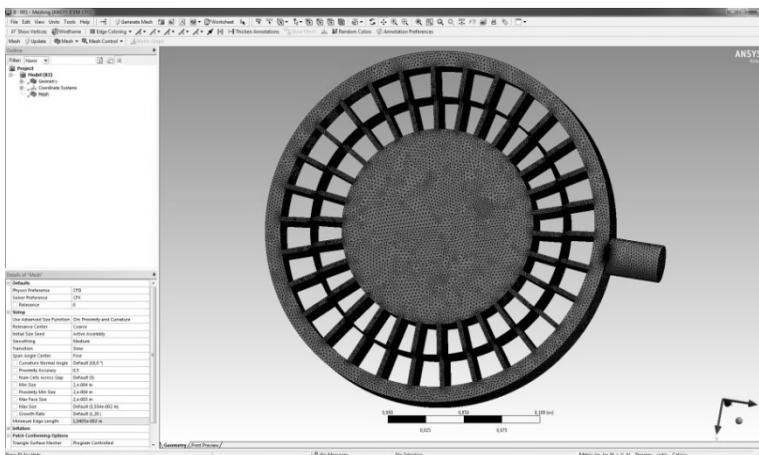


Рис. 3.15. Предварительная сетка после операции Pre-Mesh



**Рис. 3.16. Построение расчетной сетки**

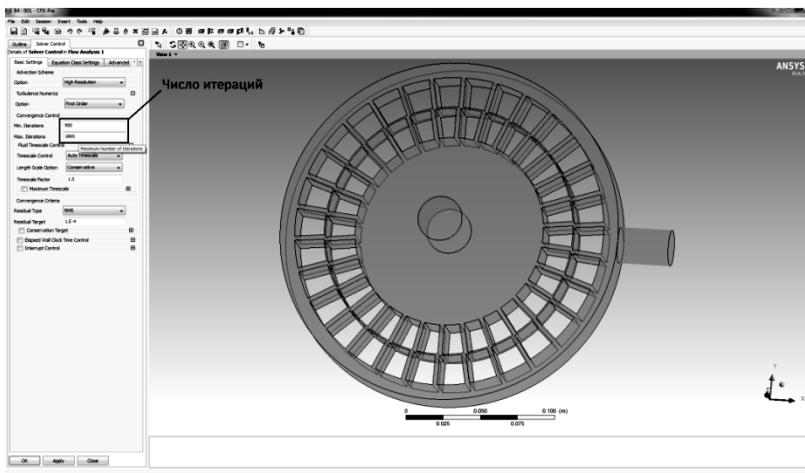
Поскольку в любой задаче обязательно существует несколько типов граничных условий (ГУ), возникает вопрос об оптимальном их сочетании и даже о корректности совместного использования некоторых типов ГУ.

Наиболее устойчивым сочетанием ГУ является задание скорости или массового расхода на входе в расчетную область и статического давления на выходе из нее. В данном варианте полное давление на входе рассчитывается.

Также достаточно стабильным является комбинирование полного давления на входе в расчетную область и скорости или расхода на выходе. Статическое давление на выходе и скорость на входе определяются расчетом. Комбинация полного давления на входе со статическим давлением на выходе является очень чувствительной к начальным значениям. Массовый расход при этой комбинации ГУ определяется расчетом.

Не рекомендуется задавать статическое давление на входе и выходе. Массовый расход и полное давление на входе являются результатами расчета, однако граничные условия слабо обуславливают расчетную область. Задание полного давления на выходе является недопустимым.

Если при заданном условии Outlet на выходе рядом с расчетной границей возможно формирование рециркуляционной зоны, то на этой границе рекомендуется использовать условие Opening. Можно также попробовать удлинить расчетную область, переместив таким образом границу выхода подальше от зоны обратных токов [20].



**Рис. 3.17. Задание числа итераций**

Зададим количество итераций вычислений. Открываем ячейку Solver Control в столбце Outline (двойной клик на Solver Control). Во вкладке Basic settings, в ячейках min. Iterations и max. Iterations вбиваем желаемое минимальное и максимальное, соответственно, количество итераций и нажимаем Ok (рис. 3.17).

Зададим материал, температурный режим, частоту вращения области ротора и модель турбулентности.

Открываем ячейку Default Domain в столбце Outline.

В графе Material (вкладка Basic settings) выбираем Water (вода).

В подпункте Domain Motion (вкладка Basic settings) в графе Option выбираем пункт Rotating, в графе Angular Velocity вводим угловую скорость вращения ротора и ось, относительно которой происходит вращение (рис. 3.18).

В графе Option окна Heat Transfer (вкладка Fluid models) выбираем температурный режим (Thermal Energy) (рис. 3.19).

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 окне вбиваем название сектора входных параметров (начальных условий), например in.

В открывшейся панели Boundary: in, во вкладке Basic settings выбираем вначале тип условий, а после локацию, где они находятся (рис. 3.20).

Тип начальных условий 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).

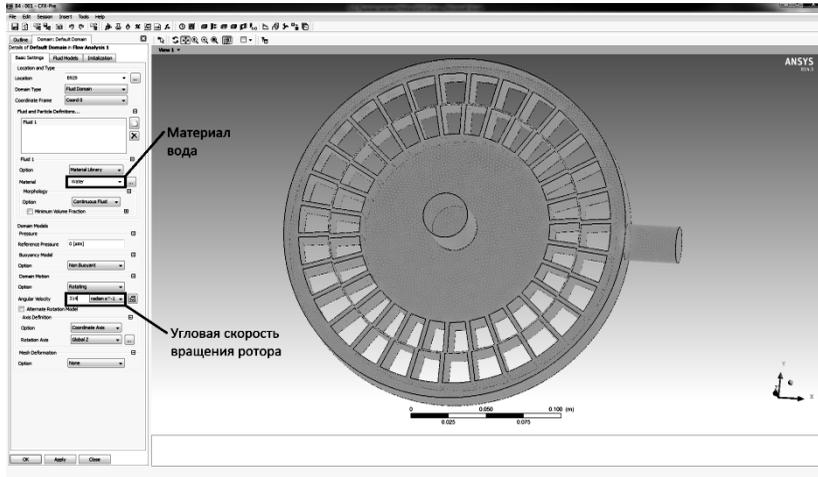


Рис. 3.18. Выбор материала (в данном случае обрабатываемая среда)

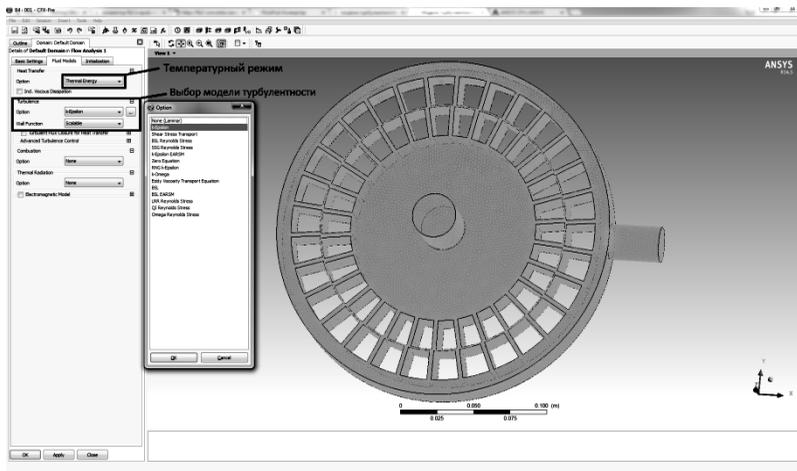
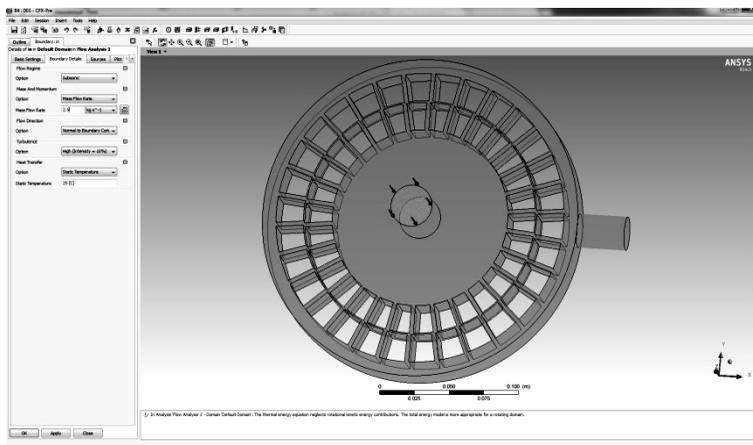


Рис. 3.19. Выбор температурного режима



**Рис. 3.20. Ввод граничных условий.**  
Указаны грани входа жидкости в каналы ротора

В графе Option панели Mass and Momentum (вкладка Boundary Details) задаем 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.

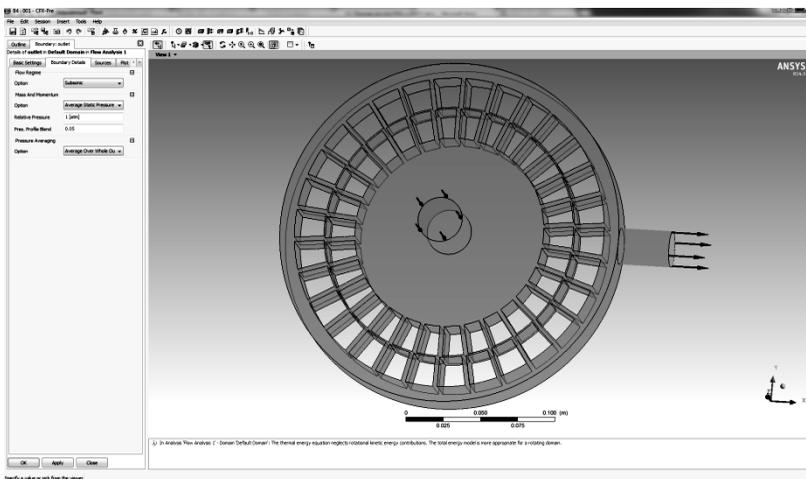
Открываем вкладку Boundary выпадающего меню Insert (клик на Solver Control).

В появившемся окне вбиваем название сектора выходных параметров, например out.

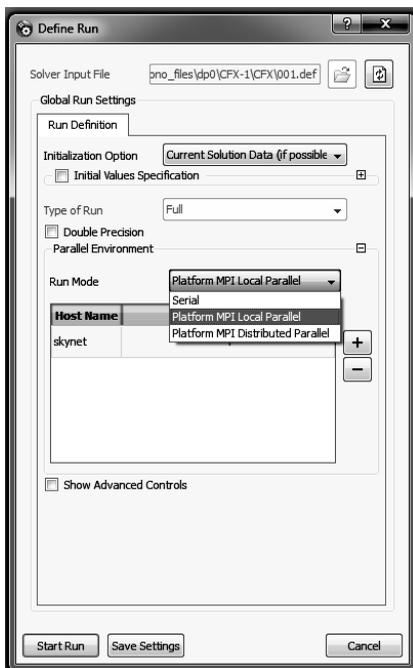
В открывшейся панели Boundary: out, во вкладке Basic settings выбираем вначале тип условий, а после локацию, где они находятся (рис. 3.21).

В графе Option панели Mass and Momentum (вкладка Boundary Details) задаем 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. 3.13. Появляется окно Define Run, в котором при нажатии на кнопку Start Ran (рис. 3.22) запускается расчет модели и открывается окно визуального отображения расчетов CFX-Solver Manager (рис. 3.23). В графе Run mode выбираем Platform MPI Local parallel для возможности подключения параллельных вычислений на многопроцессорных рабочих станциях. В открывшемся окне выбираем количество процессоров рабочей станции.



**Рис. 3.21. Ввод граничных условий.**  
**Указаны грани выхода жидкости из каналов статора**



**Рис. 3.22. Окно запуска расчета**



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 (150).

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 ее название, а во вкладке Appearance вид данных (в графе Precision выбрать вид или Fixed, или Scientific), а также количество знаков после запятой (в графе Precision).

Модель и отображаемые на ней поля давлений можно вращать и перемещать в пространстве, приближать и удалять (рис. 3.25, 3.26).

Открываем ячейку Results в Project Schematic Workbench'a (клик на Results).

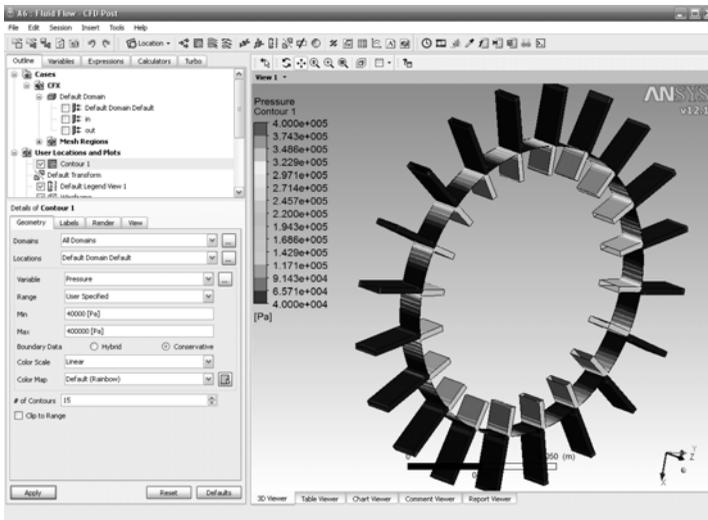
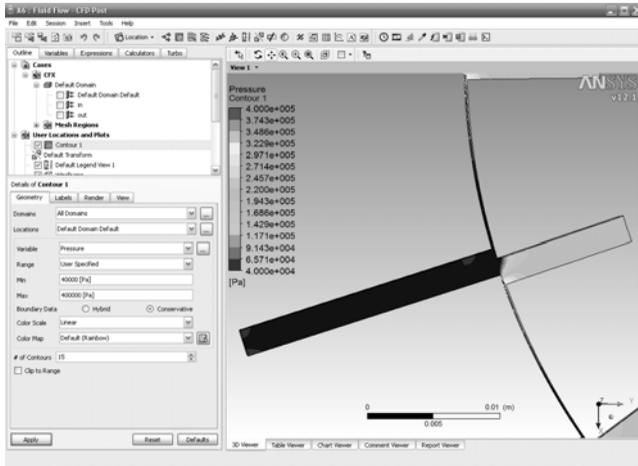


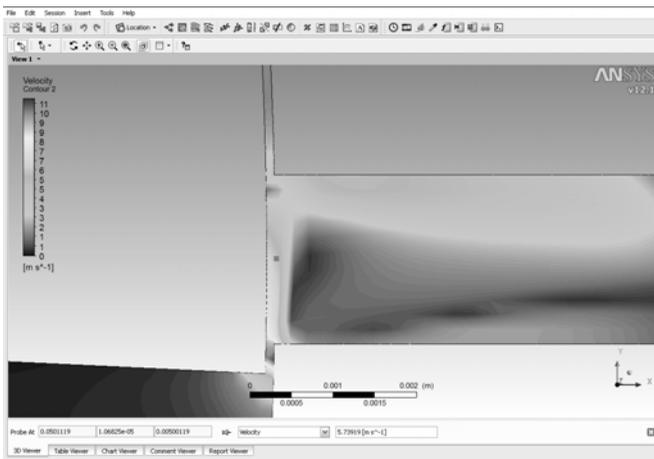
Рис. 3.25. Построение полей давлений в объеме



**Рис. 3.26. Увеличение участка модели**

Исследование численных значений скоростей и давлений в данной модели осуществляется по следующей схеме:

1. Выбирается область пространства модели, в которой необходимо провести измерение, т.е. визуально приближается либо удаляется с помощью кнопок управления (рис 3.27).
2. Выбирается точечное значение на выбранной области.
3. Выбирается отображаемая величина (давление, скорость).



**Рис. 3.27. Измерение численного значения параметров в точке**

Используя данную методику, можно определить численное значение характеристик (скорость и давление) потока жидкости в любой точке пространства ротора и статора.

### 3.3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА

Анализ решения уравнения Бернулли, приведенный в разделе 3.1, позволяет указать пути и способы управления характеристиками потока жидкости в аппарате.

На рисунке 3.4 представлен пример результата решения уравнения Бернулли численным методом в виде графических зависимостей с помощью программы расчета основных характеристик РИА при следующих значениях входных параметров:

$\omega = 314$  рад/с – угловая скорость вращения ротора;

$\delta = 1 \cdot 10^{-4}$  м – зазор между ротором и статором;

$a_p = 0,002$  м – ширина прямоугольного канала ротора;

$a_c = 0,002$  м – ширина прямоугольного канала статора;

$h = 0,01$  м – высота прямоугольных 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;

$z = 20$  – количество каналов в роторе и статоре;

$t = 20$ , °С – температура обрабатываемой жидкости;

$\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup> – плотность жидкости;

$\mu = 0,0018$  Па·с – коэффициент динамической вязкости жидкости;

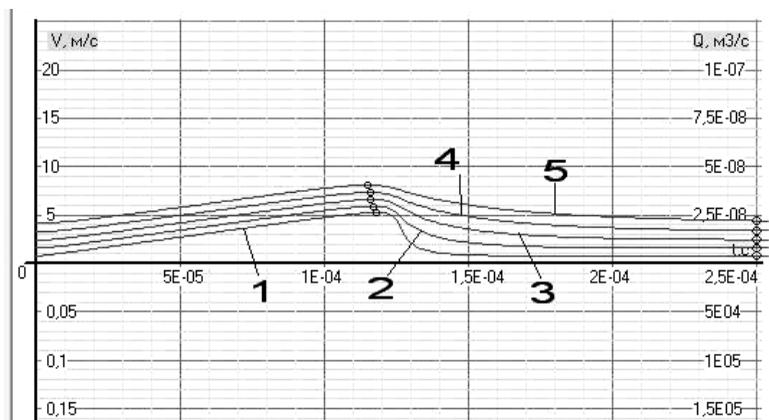
$P_{н.п} = 2338$  Па – давление насыщенного пара жидкости при температуре  $t$ ;

$P_{ст} = 3 \cdot 10^5$  Па – статическое давление (давление в полости ротора).

Проведем анализ влияния конструктивных и режимных параметров на изменение основных гидродинамических характеристик РИА. Зафиксируем все входные параметры кроме одного, влияние которого на выходные характеристики будет исследоваться. С помощью программы решения уравнения Бернулли численным методом получим графики функций характеристик за время совмещения канала ротора с каналом статора.

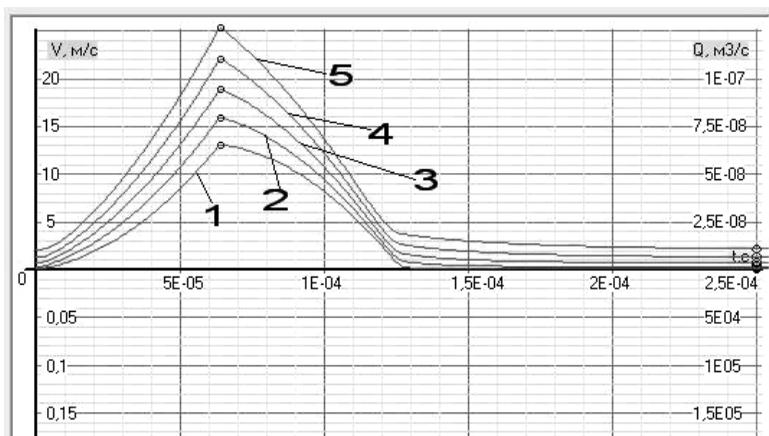
На рисунках 3.28 – 3.31 представлены графики зависимостей скорости, ускорения, расхода и давления потока воды в канале статора при различных величинах зазора между ротором и статором ( $\delta = 5 \cdot 10^{-5} \dots 2,5 \cdot 10^{-4}$  м).

Из анализа результатов расчета (см. рис. 3.28) следует, что при увеличении зазора значение скорости от времени увеличивается, а характер зависимости скорости становится более «сглаженным». Рост скорости способствует увеличению расхода (см. рис. 3.29), а значит и производительности аппарата.



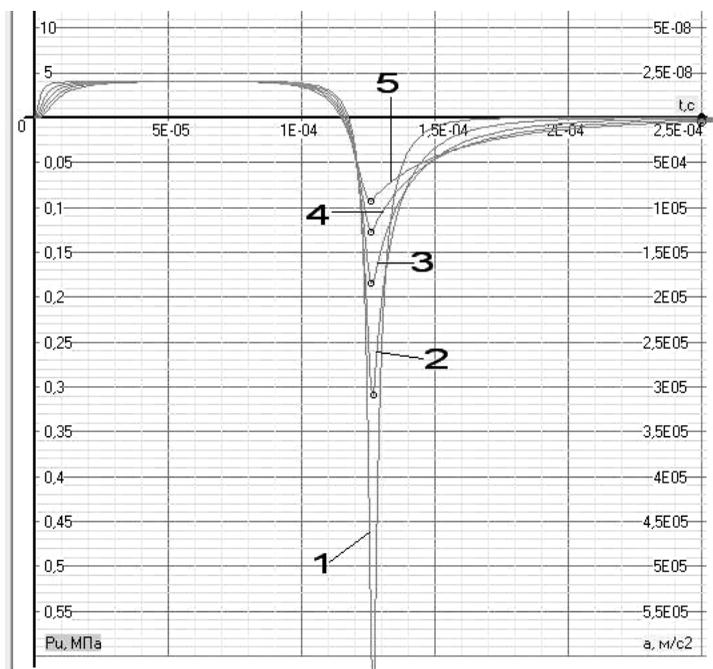
**Рис. 3.28. Графики зависимостей скорости потока жидкости в канале статора от времени при различных величинах зазора между ротором и статором:**

1 –  $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$  м; 2 –  $1 \cdot 10^{-4}$  м; 3 –  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м; 4 –  $2 \cdot 10^{-4}$  м; 5 –  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м



**Рис. 3.29. Графики зависимостей расхода через один канал от времени при различных величинах зазора между ротором и статором:**

1 –  $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$  м; 2 –  $1 \cdot 10^{-4}$  м; 3 –  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м; 4 –  $2 \cdot 10^{-4}$  м; 5 –  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м



**Рис. 3.30. Графики зависимостей ускорения от времени при различных величинах зазора между ротором и статором:**

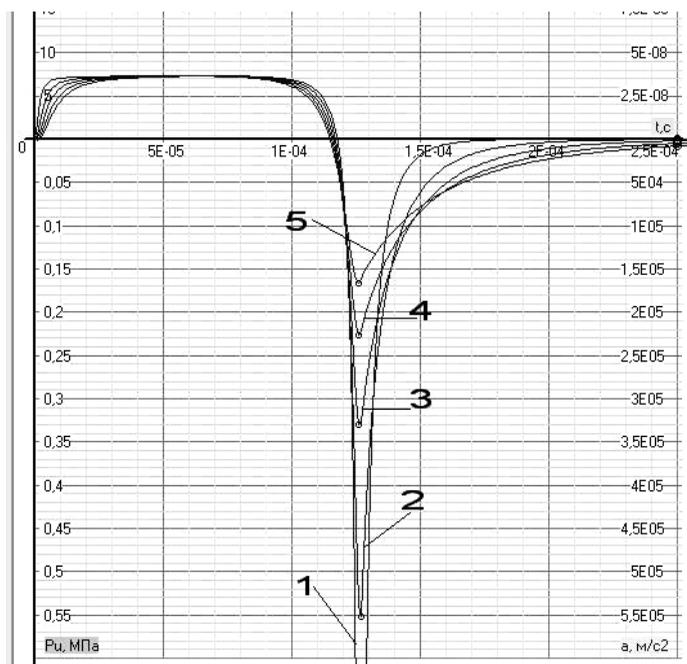
$1 - \delta = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}; 2 - 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}; 3 - 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}; 4 - 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}; 5 - 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

При анализе рис 3.30 и 3.31 можно сделать вывод о том, что при увеличении величины зазора амплитуда графиков функции ускорения и давления от времени уменьшается. Величина «отрицательной» части импульса давления уменьшается по абсолютному значению. Наиболее эффективно аппараты типа РИА работают при величине  $\delta \rightarrow 0$ , однако контролировать этот параметр довольно сложно, и установка минимально допустимого зазора между ротором и статором имеет технологические сложности, особенно при больших величинах радиуса ротора.

На рисунках 3.32 – 3.35 представлены графики зависимостей скорости, ускорения, расхода и давления потока воды в канале статора при различных величинах радиуса ротора ( $R_p = 0,075 \dots 0,150 \text{ м}$ ).

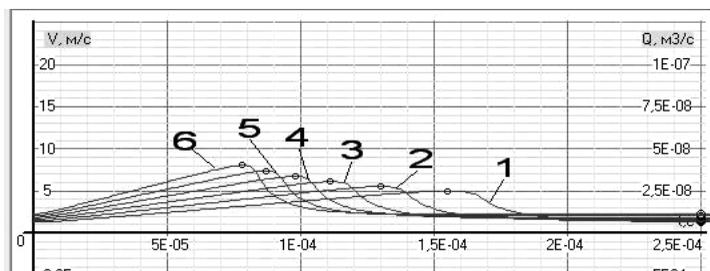
Из анализа результатов расчета характеристик потока в канале статора (см. рис. 3.32) следует, что при увеличении радиуса ротора величина скорости возрастает, а характер графиков зависимости скорости от времени становится менее плавным. Эта закономерность объясняется

увеличением центробежной силы, зависящей от радиуса аппарата. Рост скорости способствует увеличению расхода (см. рис. 3.33), а значит и производительности аппарата.



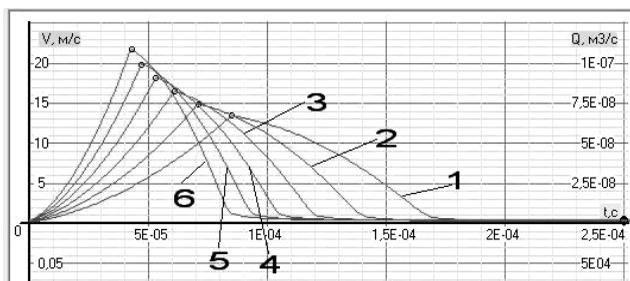
**Рис. 3.31. Графики зависимостей давления от времени при различных величинах зазора между ротором и статором:**

1 –  $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$  м; 2 –  $1 \cdot 10^{-4}$  м; 3 –  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м; 4 –  $2 \cdot 10^{-4}$  м; 5 –  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м



**Рис. 3.32. Графики зависимостей скорости от времени при различных величинах радиуса ротора:**

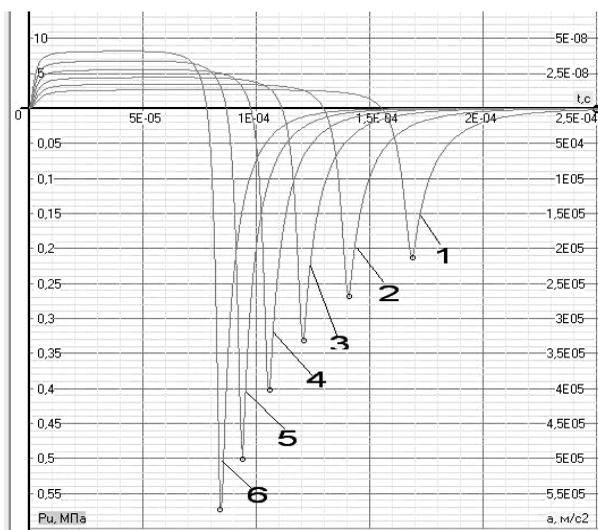
1 –  $R_p = 0,075$  м; 2 – 0,09 м; 3 – 0,105 м;  
4 – 0,12 м; 5 – 0,135 м; 6 – 0,15 м



**Рис. 3.33. Графики зависимостей расхода от времени при различных величинах радиуса ротора:**

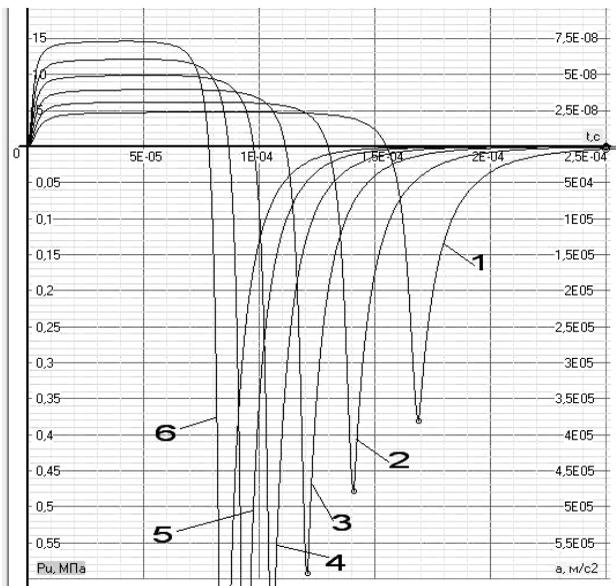
1 –  $R_p = 0,075$  м; 2 – 0,09 м; 3 – 0,105 м;  
4 – 0,12 м; 5 – 0,135 м; 6 – 0,15 м

При анализе результатов расчета по рис. 3.34 и 3.35 можно сделать вывод о том, что при увеличении величины радиуса ротора амплитуда графиков функций ускорения и давления от времени уменьшается, т.е. величина «отрицательной» части импульса давления увеличивается по абсолютному значению, при увеличении импульса давления можно предположить увеличение эффективности работы аппарата.



**Рис. 3.34. Графики зависимостей ускорения от времени при различных величинах радиуса ротора:**

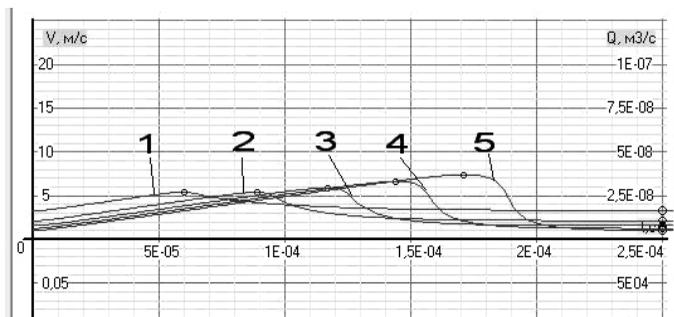
1 –  $R_p = 0,075$  м; 2 – 0,09 м; 3 – 0,105 м;  
4 – 0,12 м; 5 – 0,135 м; 6 – 0,15 м



**Рис. 3.35. Графики зависимостей давления от времени при различных величинах радиуса ротора:**

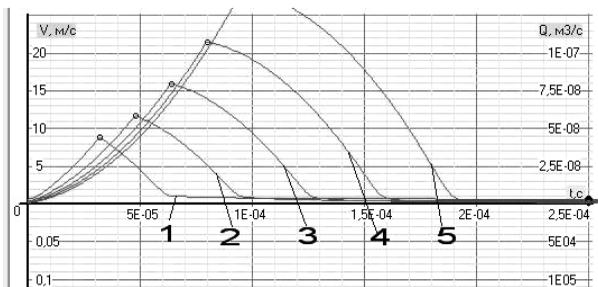
1 –  $R_p = 0,075$  м; 2 –  $0,09$  м; 3 –  $0,105$  м;  
4 –  $0,12$  м; 5 –  $0,135$  м; 6 –  $0,15$  м

На рисунках 3.36 – 3.39 представлены графики зависимостей скорости, ускорения, расхода и давления потока воды в канале статора прямоугольного сечения при различных величинах ширины каналов ( $a = 0,001 \dots 0,003$  м).



**Рис. 3.36. Графики зависимостей скорости от времени при изменении ширины каналов:**

1 –  $a = 0,001$  м; 2 –  $0,0015$  м; 3 –  $0,002$  м; 4 –  $0,0025$  м; 5 –  $0,003$  м

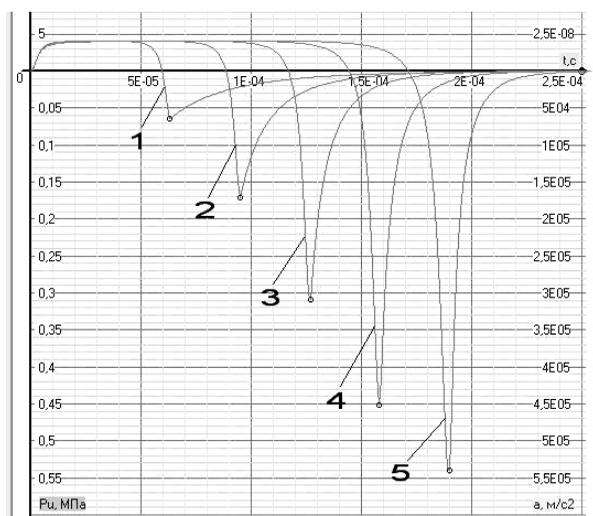


**Рис. 3.37. Графики зависимостей расхода от времени при изменении ширины каналов:**

$1 - a = 0,001$  м;  $2 - 0,0015$  м;  $3 - 0,002$  м;  $4 - 0,0025$  м;  $5 - 0,003$  м

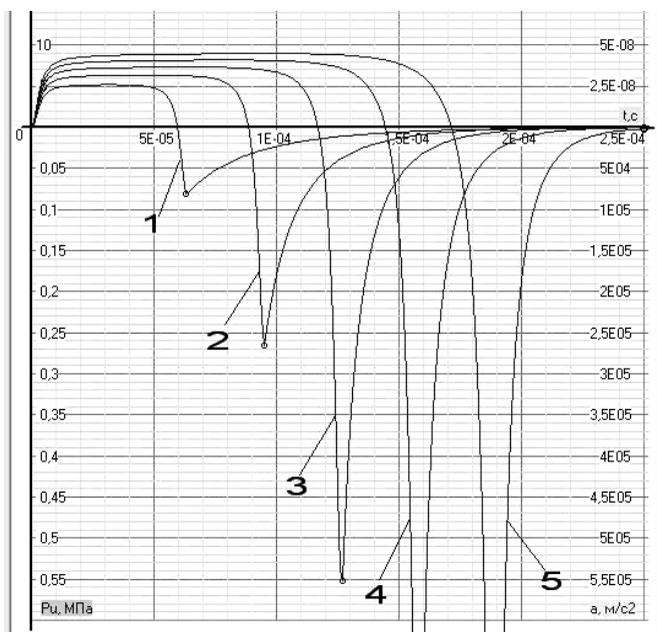
Из анализа результатов расчета характеристик потока в канале статора от ширины канала прямоугольного сечения (см. рис. 3.36) можно сделать вывод, что при увеличении ширины канала значение скорости от времени увеличивается. Рост скорости способствует увеличению расхода (см. рис. 3.37), а значит и производительности аппарата.

При анализе результатов расчета на рис. 3.38 и 3.39 можно сделать вывод, что при увеличении величины ширины каналов амплитуда графиков функции ускорения и давления увеличивается.



**Рис. 3.38. Графики зависимостей ускорения от времени при изменении ширины каналов:**

$1 - a = 0,001$  м;  $2 - 0,0015$  м;  $3 - 0,002$  м;  $4 - 0,0025$  м;  $5 - 0,003$  м

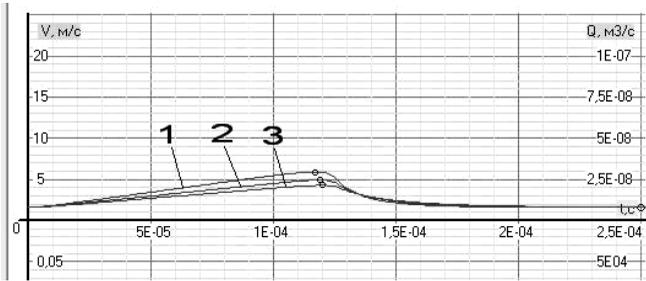


**Рис. 3.39. Графики зависимостей давления от времени при изменении ширины каналов:**

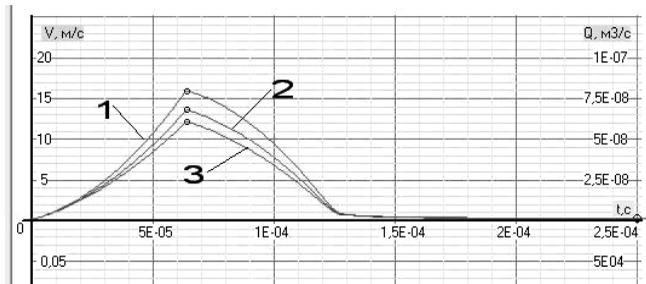
1 –  $a = 0,001$  м; 2 –  $0,0015$  м; 3 –  $0,002$  м; 4 –  $0,0025$  м; 5 –  $0,003$  м

Ширину каналов прямоугольного сечения нельзя рассматривать как основной параметр, который позволяет увеличить амплитуду скорости, ускорения, импульсного давления и расхода, так как при больших скоростях потока происходит проскок локальных объемов жидкости через каналы без кавитационного и механического воздействий. При равенстве величин ширины канала и расстояния между двумя соседними каналами кривые графиков зависимостей ускорения, импульсного давления и расхода будут близки к синусоиде. Для каждого технологического процесса и обрабатываемой жидкости ширина каналов может быть определена из опыта и рекомендаций.

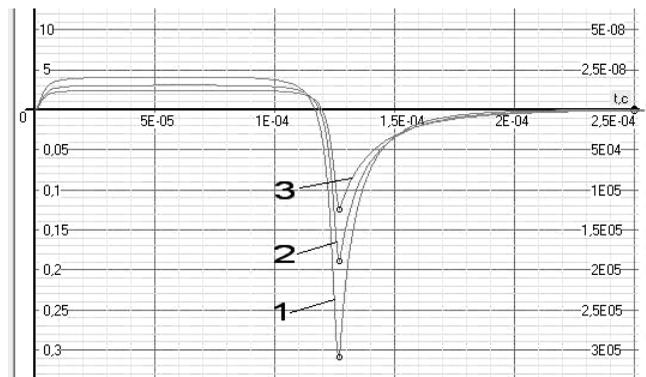
На рисунках 3.40 – 3.43 представлены графики зависимостей скорости, ускорения, расхода и давления потока воды в канале статора при различных величинах длины каналов ротора от ( $l_p = 0,01 \dots 0,03$  м). Из анализа результатов расчета можно сделать вывод, что при увеличении длины каналов ротора значение скорости и расхода уменьшается (см. рис. 3.40, 3.41), амплитуда графиков функции ускорения и давления уменьшается (см. рис. 3.42, 3.43).



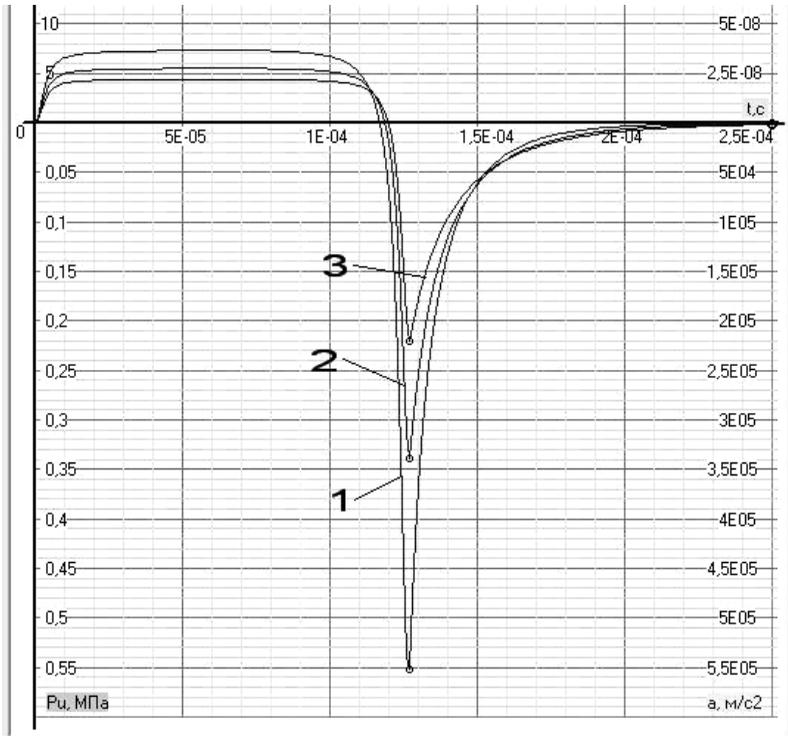
**Рис. 3.40. Графики зависимостей скорости от времени при изменении длины канала:**  
 $l - l_p = 0,01$  м; 2 – 0,02 м; 3 – 0,03 м



**Рис. 3.41. Графики зависимостей расхода от времени при изменении длины канала:**  
 $l - l_p = 0,01$  м; 2 – 0,02 м; 3 – 0,03 м

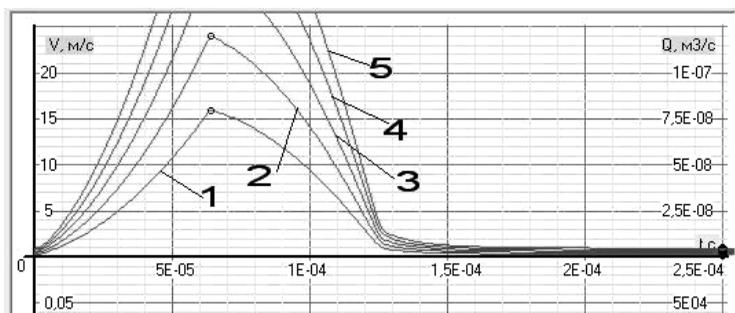


**Рис. 3.42. Графики зависимостей ускорений от времени при изменении длины канала:**  
 $l - l_p = 0,01$  м; 2 – 0,02 м; 3 – 0,03 м

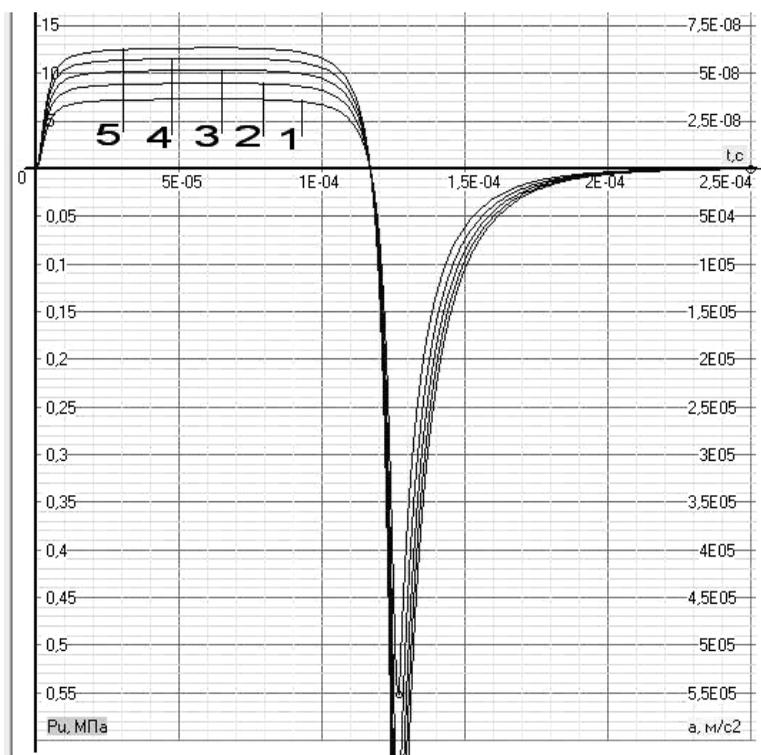


**Рис. 3.43. Графики зависимостей импульсного давления от времени при изменении длины канала:**  
 $1 - l_p = 0,01 \text{ м}; 2 - 0,02 \text{ м}; 3 - 0,03 \text{ м}$

На рисунках 3.44 и 3.45 представлены графики зависимостей расхода и давления потока воды в канале статора при различных величинах высоты каналов ( $h = 0,01 \dots 0,03 \text{ м}$ ). Изменение высоты каналов не влияет на зависимости скорости и ускорения. При увеличении высоты каналов расход увеличивается, возрастает производительность аппарата. Такая закономерность объясняется увеличением проходного сечения каналов при неизменной скорости течения. При увеличении величины высоты каналов амплитуда графиков функции ускорения и давления увеличивается. Значение экстремума функции давления от времени уменьшается, величина отрицательного импульса давления увеличивается по абсолютному значению, что свидетельствует об увеличении эффективности работы аппарата. Такая закономерность объясняется прямой зависимостью давления от площади сечения канала при неизменном ускорении жидкости.



**Рис. 3.44. Графики зависимостей расхода от времени при изменении высоты канала:**  
 $1 - h = 0,01$  м;  $2 - 0,015$  м;  $3 - 0,02$  м;  $4 - 0,025$  м;  $5 - 0,03$  м

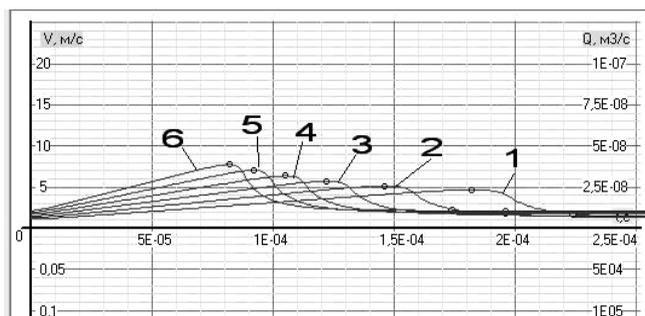


**Рис. 3.45. Графики зависимостей импульсного давления от времени при изменении высоты каналов:**  
 $1 - h = 0,01$  м;  $2 - 0,015$  м;  $3 - 0,02$  м;  $4 - 0,025$  м;  $5 - 0,03$  м

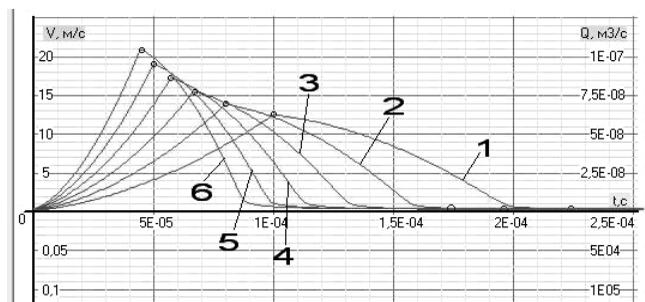
На рисунках 3.46 – 3.49 представлены графики зависимостей скорости, ускорения, расхода и давления потока воды в канале статора при различных величинах угловой скорости вращения ротора ( $\omega = 200 \dots 450 \text{ с}^{-1}$ ).

На основании результатов расчета можно сделать вывод, что с увеличением угловой скорости вращения ротора скорость и расход жидкости в канале статора, амплитуда графиков функции ускорения и давления значительно увеличивается.

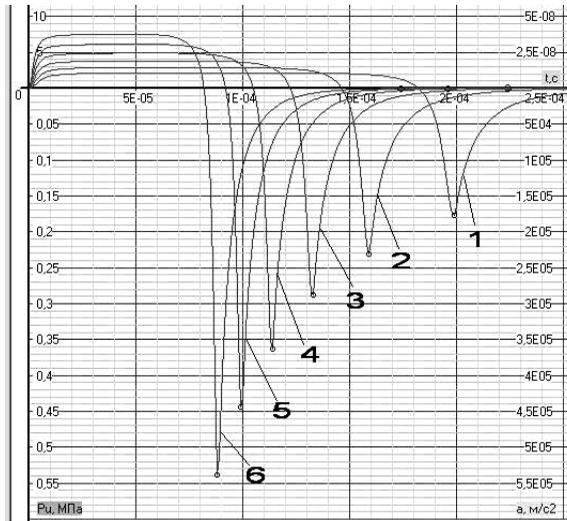
На рисунках 3.50 – 3.53 представлены графики зависимостей скорости, ускорения, расхода и давления потока воды в канале статора при различных величинах статического давления на входном патрубке в полость ротора ( $P_{\text{ст}} = 1 \cdot 10^5 \dots 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ). С увеличением статического давления скорость и расход увеличиваются, амплитуда графиков функций ускорения и давления увеличивается.



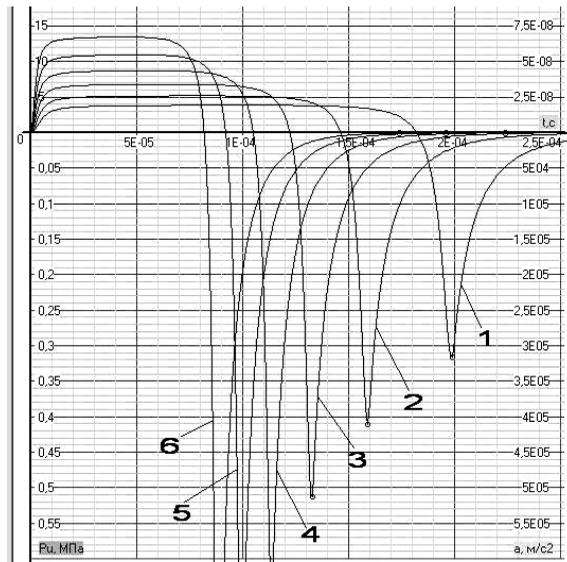
**Рис. 3.46. Графики зависимости скорости от времени при различных величинах угловой скорости вращения:**  
 $1 - \omega = 200 \text{ с}^{-1}$ ;  $2 - 250 \text{ с}^{-1}$ ;  $3 - 300 \text{ с}^{-1}$ ;  $4 - 350 \text{ с}^{-1}$ ;  $5 - 400 \text{ с}^{-1}$ ;  $6 - 450 \text{ с}^{-1}$



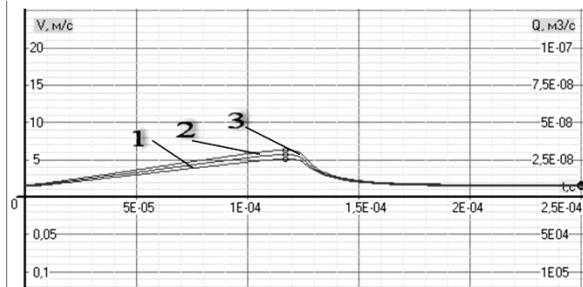
**Рис. 3.47. Графики зависимости расхода через один канал от времени при различных величинах угловой скорости вращения:**  
 $1 - \omega = 200 \text{ с}^{-1}$ ;  $2 - 250 \text{ с}^{-1}$ ;  $3 - 300 \text{ с}^{-1}$ ;  $4 - 350 \text{ с}^{-1}$ ;  $5 - 400 \text{ с}^{-1}$ ;  $6 - 450 \text{ с}^{-1}$



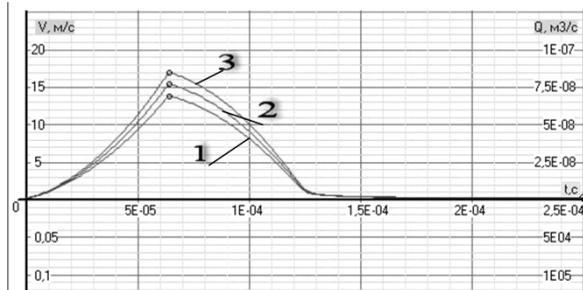
**Рис. 3.48. Графики зависимостей ускорения от времени при различных величинах угловой скорости вращения:**  
 $1 - \omega = 200 \text{ c}^{-1}$ ;  $2 - 250 \text{ c}^{-1}$ ;  $3 - 300 \text{ c}^{-1}$ ;  $4 - 350 \text{ c}^{-1}$ ;  $5 - 400 \text{ c}^{-1}$ ;  $6 - 450 \text{ c}^{-1}$



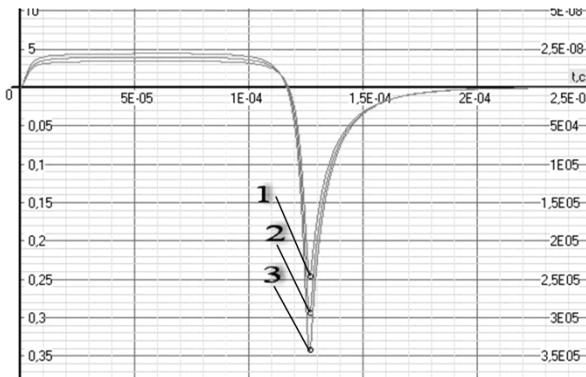
**Рис. 3.49. Графики зависимостей давления от времени при различных величинах угловой скорости вращения:**  
 $1 - \omega = 200 \text{ c}^{-1}$ ;  $2 - 250 \text{ c}^{-1}$ ;  $3 - 300 \text{ c}^{-1}$ ;  $4 - 350 \text{ c}^{-1}$ ;  $5 - 400 \text{ c}^{-1}$ ;  $6 - 450 \text{ c}^{-1}$



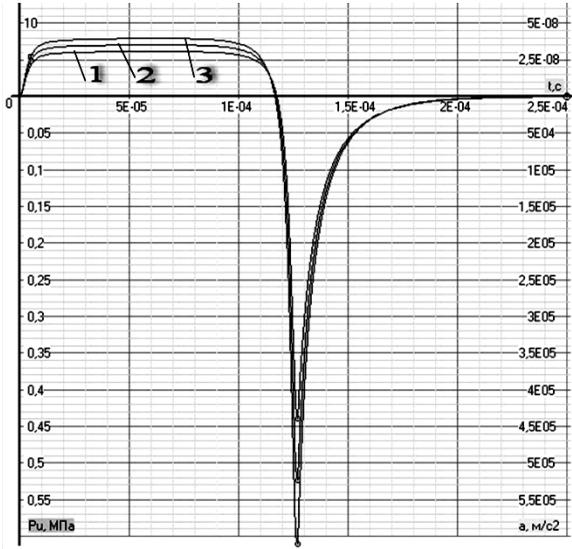
**Рис. 3.50. Графики зависимостей скорости от времени при различных величинах статического давления:**  
 $1 - P_{ст} = 1 \cdot 10^5$  Па;  $2 - 2,5 \cdot 10^5$  Па;  $3 - 4 \cdot 10^5$  Па



**Рис. 3.51. Графики зависимостей расхода при различных величинах статического давления:**  
 $1 - P_{ст} = 1 \cdot 10^5$  Па;  $2 - 2,5 \cdot 10^5$  Па;  $3 - 4 \cdot 10^5$  Па

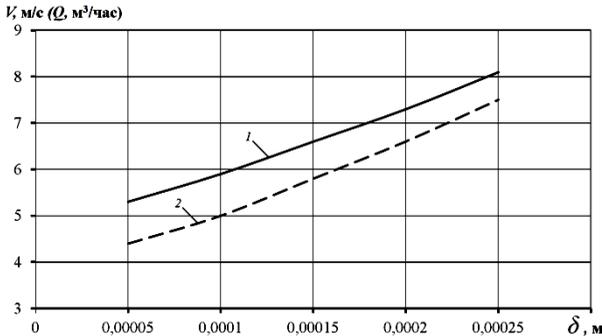


**Рис. 3.52. Графики зависимостей ускорения при различных величинах статического давления:**  
 $1 - P_{ст} = 1 \cdot 10^5$  Па;  $2 - 2,5 \cdot 10^5$  Па;  $3 - 4 \cdot 10^5$  Па

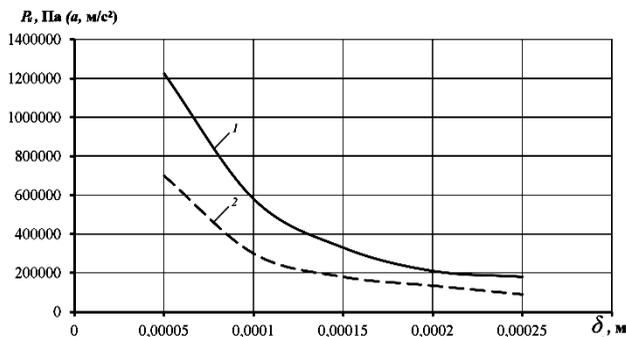


**Рис. 3.53. Графики зависимостей импульсного давления при различных величинах статического давления:**  
 $1 - P_{ст} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $2 - 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $3 - 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$

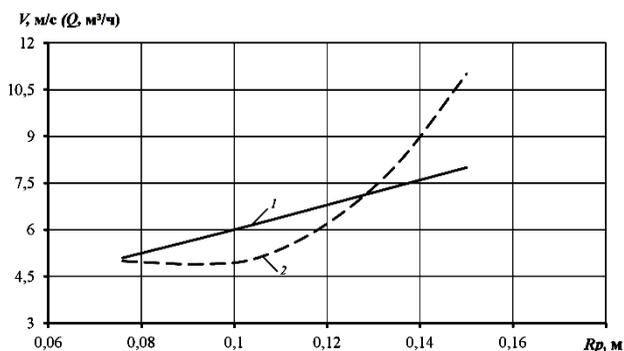
На основании данных вычислительных экспериментов по определению влияния геометрических и режимных параметров РИА на зависимости скорости, ускорения, расхода и давления потока воды в канале статора построены графики зависимостей скорости, ускорения, расхода и импульсного давления в канале статора от основных геометрических и режимных параметров аппарата (рис. 3.54 – 3.67).



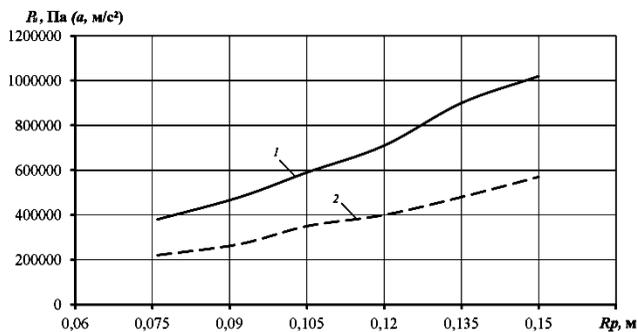
**Рис. 3.54. Зависимости скорости и расхода от изменения величины зазора между ротором и статором:**  
 $1 - \text{скорость } V, \text{ м/с}$ ;  $2 - \text{расход } Q, \text{ м}^3/\text{ч}$



**Рис. 3.55. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения величины зазора между ротором и статором:**  
 1 – импульсное давление  $P_i$ , Па; 2 – ускорение  $a$ ,  $\text{м/с}^2$



**Рис. 3.56. Зависимости скорости и расхода от изменения величины радиуса ротора:**  
 1 – скорость  $V$ ,  $\text{м/с}$ ; 2 – расход  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$



**Рис. 3.57. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения величины радиуса ротора:**  
 1 – импульсное давление  $P_i$ , Па; 2 – ускорение  $a$ ,  $\text{м/с}^2$

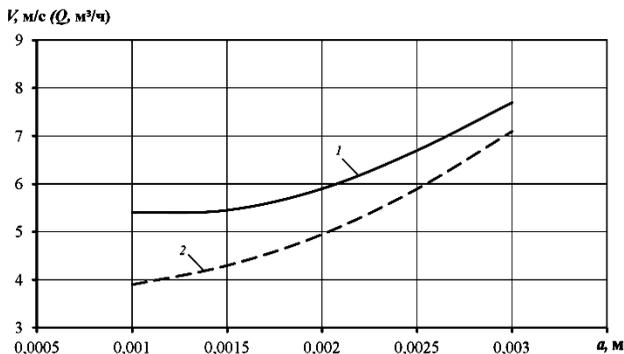


Рис. 3.58. Зависимости скорости и расхода от изменения ширины каналов:  
 1 – скорость  $V$ , м/с; 2 – расход  $Q$ , м³/ч

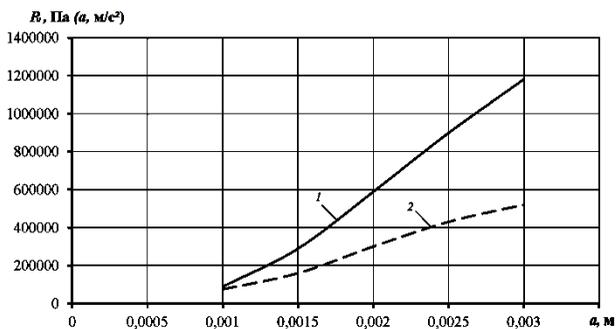


Рис. 3.59. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения ширины каналов:  
 1 – импульсное давление  $P_n$ , Па; 2 – ускорение  $a$ , м/с²

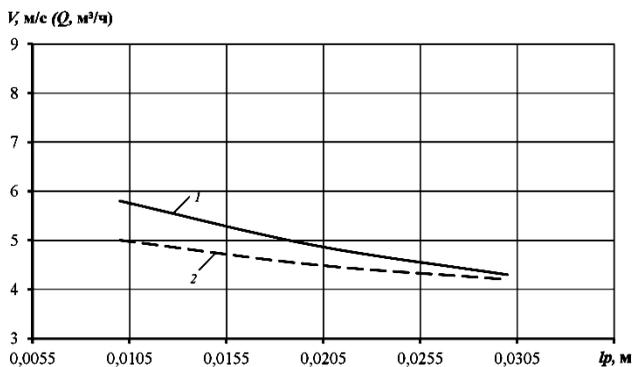
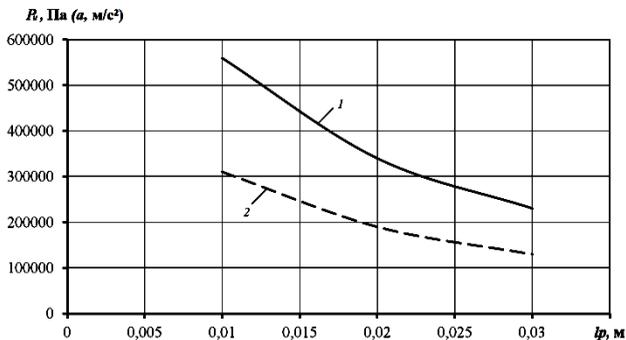
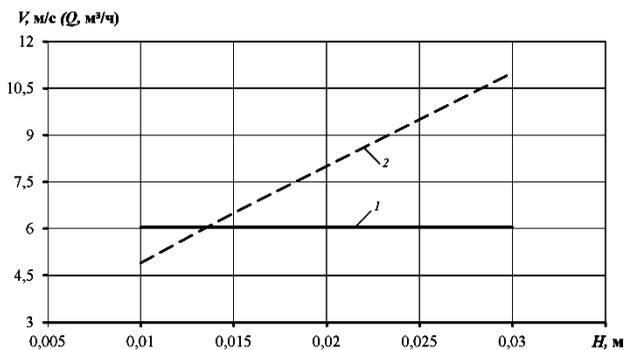


Рис. 3.60. Зависимости скорости и расхода от изменения длины каналов ротора:  
 1 – скорость  $V$ , м/с; 2 – расход  $Q$ , м³/ч



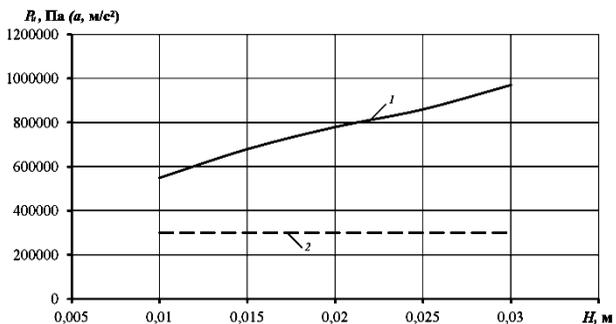
**Рис. 3.61. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения длины каналов ротора:**

1 – импульсное давление  $P_{и}$ , Па; 2 – ускорение  $a$ ,  $\text{м/с}^2$



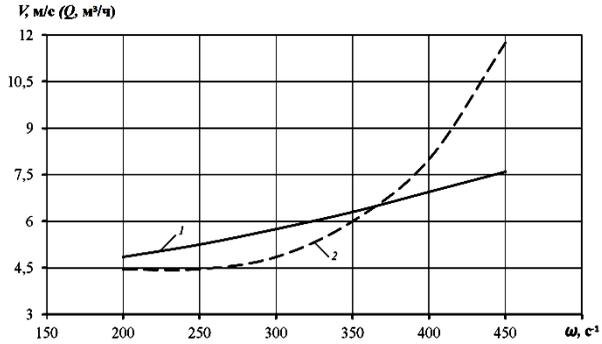
**Рис. 3.62. Зависимости скорости и расхода от изменения высоты каналов:**

1 – скорость  $V$ ,  $\text{м/с}$ ; 2 – расход  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$

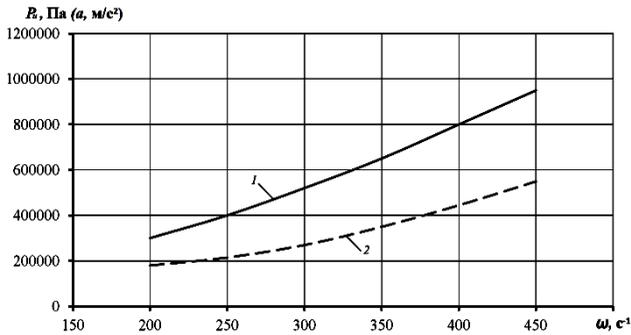


**Рис. 3.63. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения высоты каналов:**

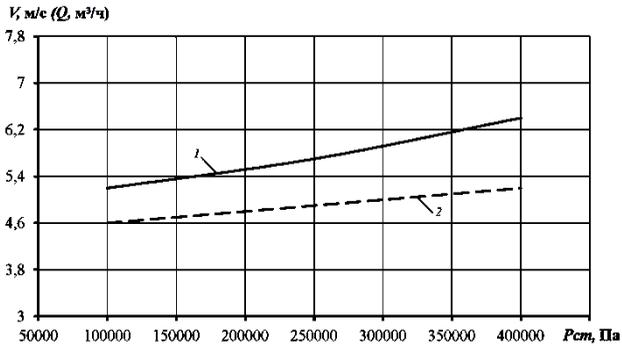
1 – импульсное давление  $P_{и}$ , Па; 2 – ускорение  $a$ ,  $\text{м/с}^2$



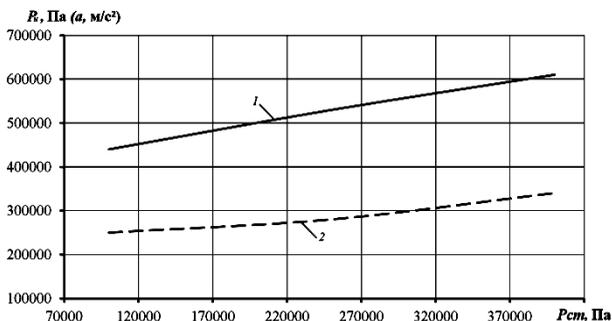
**Рис. 3.64. Зависимости скорости и расхода от изменения скорости вращения ротора:**  
 1 – скорость  $V, \text{м/с}$ ; 2 – расход  $Q, \text{м}^3/\text{ч}$



**Рис. 3.65. Зависимости ускорения и импульсного давления от скорости вращения ротора:**  
 1 – импульсное давление  $P_{\text{и}}, \text{Па}$ ; 2 – ускорение  $a, \text{м/с}^2$



**Рис. 3.66. Зависимости скорости и расхода от изменения статического давления:**  
 1 – скорость  $V, \text{м/с}$ ; 2 – расход  $Q, \text{м}^3/\text{ч}$



**Рис. 3.67. Зависимости ускорения и импульсного давления от изменения статического давления:**

1 – импульсное давление  $P$ , Па; 2 – ускорение  $a$ , м/с<sup>2</sup>

Анализ полученных графических 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 анализа приведены в табл. 3.1.

Производными характеристиками от ускорения потока жидкости в канале статора являются энергия импульса давления в канале статора (2.50) и интенсивность акустического излучения (2.51). К основным параметрам аппарата, влияющим на величину интенсивности акустического излучения, можно отнести зазор между ротором и статором –  $\delta$ , скорость перекрытия каналов –  $\omega R_p$  и ширину прямоугольного канала в роторе и статоре –  $a$ . Графики зависимостей интенсивности акустического излучения от параметров  $\delta$ ,  $\omega R_p$  и  $a$  показаны на рис. 3.68 – 3.70.

На основании анализа графических зависимостей на рис. 3.68 – 3.70 можно сделать вывод о том, что на параметр интенсивности акустического излучения в большей степени влияет скорость перекрытия каналов –  $\omega R_p$ . Для величины  $\omega R_p = 28,0$  м/с и более происходит резкое возрастание интенсивности акустического излучения. Так же при увеличении ширины канала ротора и статора увеличивается интенсивность акустического излучения. При уменьшении величины зазора между ротором и статором от  $\delta = 0,2$  мм и менее наблюдается резкое увеличение интенсивности акустического излучения. Это обусловлено увеличением величин ускорения потока жидкости и амплитуды импульсного давления для указанных параметров.

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

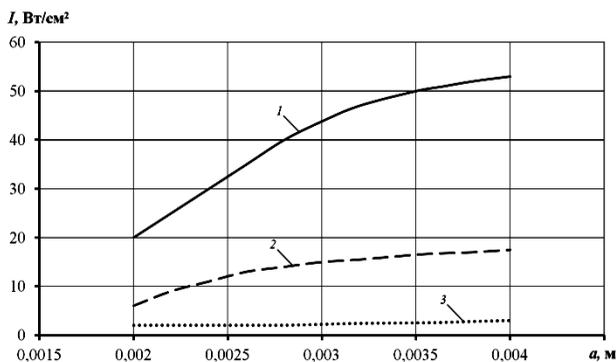
Увеличиваемый параметр	Обозначение	Диапазон значений параметра	Влияние параметра на характеристики потока жидкости в канале статора*			
			$V(t)$	$a(t)$	$Q(t)$	$P_{и}(t)$
Угловая скорость вращения ротора, $c^{-1}$	$\omega$	200...450	+	+	+	+
Статическое давление, Па	$P_{ст}$	$1 \cdot 10^5 \dots 4 \cdot 10^5$	+	+	+	+
Зазор между ротором и статором, м	$\delta$	$5 \cdot 10^{-5} \dots 2,5 \cdot 10^{-4}$	+	-	+	-
Радиус ротора, м	$R_p$	0,075...0,150	+	+	+	+
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:

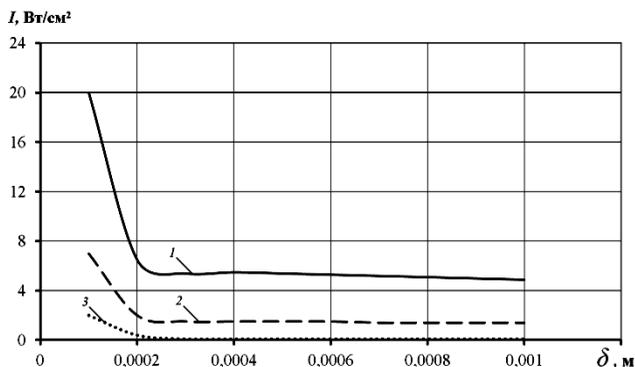
«+» – увеличение параметра способствует увеличению величины характеристики потока жидкости в канале статора;

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

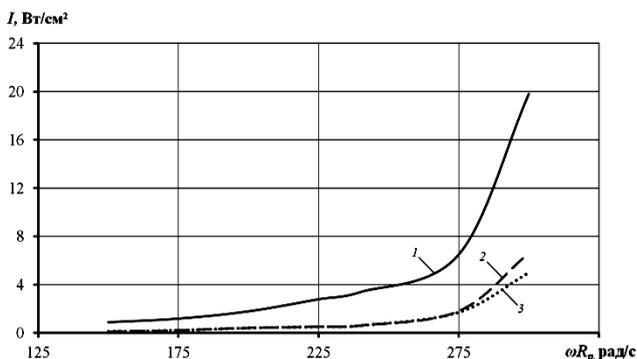
0 – увеличение параметра несущественно влияет на величину характеристики потока жидкости в канале статора РИА.



**Рис. 3.68. Графики зависимостей интенсивности акустического излучения от ширины канала статора при различных величинах скорости перекрытия каналов:**  
 $1 - \omega R_p = 30$  м/с;  $2 - 28$  м/с;  $3 - 15$  м/с



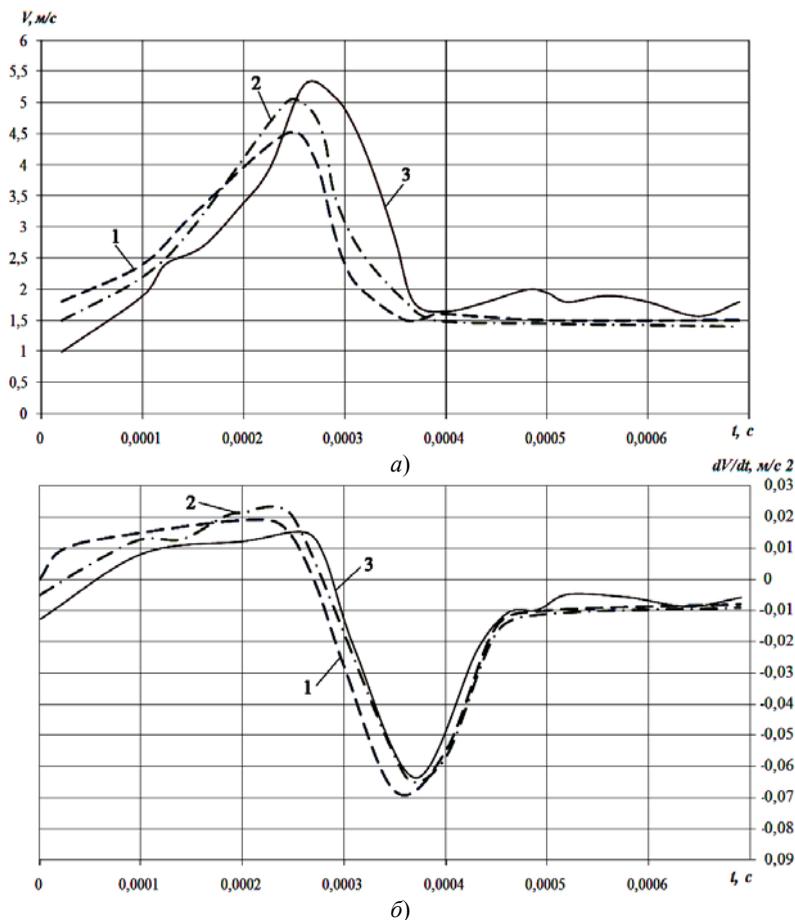
**Рис. 3.69. Графики зависимостей интенсивности акустического излучения от зазора между ротором и статором при различных величинах скорости перекрытия каналов:**  
 $1 - \omega R_p = 30 \text{ м/с}$ ;  $2 - 28 \text{ м/с}$ ;  $3 - 15 \text{ м/с}$



**Рис. 3.70. Графики зависимостей интенсивности акустического излучения от скорости перекрытия каналов при различных величинах зазора:**  
 $1 - \delta = 0,0001 \text{ м}$ ;  $2 - 0,0005 \text{ м}$ ;  $3 - 0,001 \text{ м}$

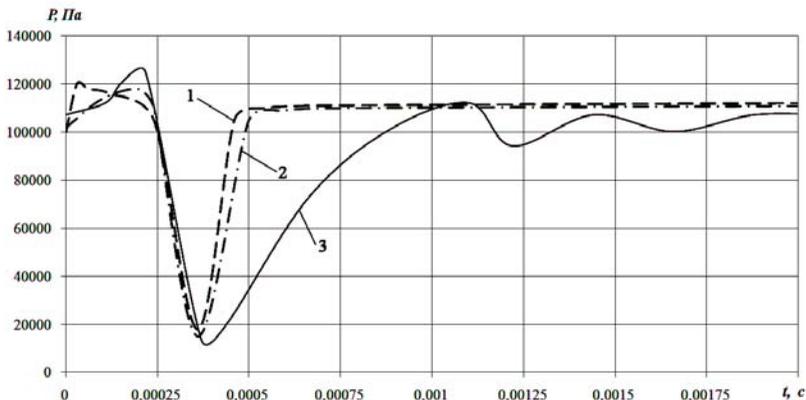
Используя данные скорости, ускорения и давления потока жидкости в каналах статора, полученные на основе решения уравнения Бернулли (2.31) численным методом и программным продуктом ANSYS CFX при одинаковых геометрических и технологических параметрах, сравним точность их решения. Графики зависимости скорости и ускорения потока жидкости в канале статора от времени показаны на рис. 3.71.

Анализ результатов, представленных на рис. 3.71, показывает, что разница в результатах расчета скорости и ускорения потока жидкости в канале статора РИА при численном решении уравнения (2.31) и при решении уравнений (3.3) программным продуктом ANSYS CFX не превышает 10% для скорости и 5% для ускорения.



**Рис. 3.71. Графики зависимости скорости (а) и ускорения (б) потока жидкости от времени, полученные различными методами расчета:**  
 1 – численное решение уравнения (2.31); 2 – решение уравнений (3.3) программным продуктом ANSYS CFX;  
 3 – экспериментальные данные по данным рис. 3.72

На рисунке 3.72 показаны графики зависимости давления в потоке жидкости от времени, полученные при численном решении уравнения (2.31) и при решении уравнений (3.3) программным продуктом ANSYS CFX. На основании анализа расчетных и экспериментальных данных выявлено, что наиболее точно согласуются с экспериментальными данными зависимости давления от времени, полученные программным продуктом ANSYS CFX.



**Рис. 3.72. Графики зависимости давления в потоке жидкости от времени, полученные различными методами расчета:**  
 1 – численное решение уравнения (2.31); 2 – решение уравнения (3.3) программным продуктом ANSYS CFX; 3 – график зависимости давления в потоке жидкости, полученный по экспериментальным данным

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:  $5 \leq l_p, c/a_p, c \leq 10$ ;  $250 \leq R_p/\delta \leq 1250$ ;  $5 \leq h_p, c/a_p, c \leq 15$ ;  $144 \leq z/R_p \leq 480$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 3

1. **Промтов, М. А.** Пульсационные аппараты роторного типа: Теория и практика / М. А. Промтов. – М. : Машиностроение, 2001. – 260 с.
2. **Юдаев, В. Ф.** Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды / В. Ф. Юдаев // Теоретические основы химической технологии. – 1994. – Т. 28, № 6. – С. 581 – 590.
3. **Зимин, А. И.** Прикладная механика прерывистых течений / А. И. Зимин. – М. : Фолиант, 1997. – 308 с.
4. **Промтов, М. А.** Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа / М. А. Промтов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 9. – С. 13 – 15.
5. **Промтов, М. А.** Модель течения жидкости через прерыватель одноступенчатого роторно-импульсного аппарата / М. А. Промтов, А. И. Зимин, М. В. Монастырский // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23, № 1–2. – С. 129 – 133.

6. **Майстренко, А. В.** Численные методы расчета, моделирования и проектирования технологических процессов и оборудования : учеб. пособие / А. В. Майстренко, Н. В. Майстренко. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 144 с.

7. **Бахвалов, Н. С.** Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М. : Бином, 2001. – С. 363 – 375.

8. **Ильина, В. А.** Численные методы для физиков-теоретиков / В. А. Ильина, П. К. Силаев. – Москва–Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. – Т. 2. – С. 16 – 30.

9. **Butcher, J. C.** Numerical Methods for Ordinary Differential Equations / J. C. Butcher. – John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 463 p.

10. **Демидович, Б. П.** Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения : учеб. пособие / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова ; под ред. Б. П. Демидович. – 4-е изд., стер. – М. ; СПб. ; Краснодар : Лань, 2008. – 400 с.

11. **Расчет** основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа : Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2009614517 / Промтов М. А., Сундуков М. С. – 24.08.2009.

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

13. **Сайлер, Б.** Использование Visual Basic 6. Классическое издание = Special Edition Using Visual Basic 6 / Б. Сайлер, Д. Споттс. – М. : Вильямс, 2007. – С. 832.

14. **Эпплман, Д.** Win32 API и Visual Basic. Для профессионалов. Dan Appleman's Visual Basic Programmer's Guide to the Win32 API / Д. Эпплман. – СПб. : Питер, 2001. – 1120 с.

15. **Сафронов, И. К.** Visual Basic в задачах и примерах / И. К. Сафронов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 400 с.

16. **Промтов, М. А.** Исследование гидродинамических закономерностей работы роторно-импульсного аппарата / М. А. Промтов // Теор. основы хим. технол. – 2001. – Т. 35, № 1. – С. 103 – 106.

17. **Плыкин, М.** Новые возможности ANSYS CFX и IСЕМ CDF / М. Плыкин // ANSYS-Solutions. Русская редакция. – 2008. – № 7. – С. 28 – 32.

18. **Каплун, А. В.** ANSYS в руках инженера : практ. руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

19. **Плыкин, М.** Подвижные, деформируемые и перестраиваемые сетки в ANSYS CFX и FLUENT / М. Плыкин // ANSYS-Solutions. Русская редакция. – 2007. – № 5. – С. 38 – 45.
20. **Басов, К. А.** ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов ; под общ. ред. Д. Г. Красковского. – М. : КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
21. **Басов, К. А.** Графический интерфейс комплекса ANSYS / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2006. – 248 с.
22. **Sly, D.** Module Pre/Post ANSYS CFX / D. Sly, M. Plykin // ANSYS-Solution. – 2006. – № 2. – С. 24 – 30.
23. **Чигарев, А.В.** ANSYS для инженеров. Справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк– М. : Машиностроение 1, 2004. – 512 с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Роторные импульсные аппараты применяются для интенсификации процессов в гетерогенных жидкостях. Имеется большое количество примеров успешного использования РИА для интенсификации процессов эмульгирования, диспергирования и гомогенизации, растворения и экстрагирования, насыщения жидкостей газом и ряд других процессов. В последнее время РИА применяются также для обработки гомогенных жидкостей с целью изменить структуру веществ, инициировать образование ионов и свободных радикалов, активировать различные жидкости.

Широкое применение РИА в промышленности сдерживает отсутствие универсальных и точных методик расчета как технологических процессов, так и параметров самих аппаратов, в которых эти процессы реализуются. Многие исследователи разрабатывали методики расчета как для отдельных химико-технологических процессов, так и для РИА определенного типа.

В этой работе мы сделали попытку проанализировать и обобщить методы расчета РИА. На основе этого анализа, теоретических и экспериментальных исследований работы РИА с различными жидкостями разработана методика инженерного расчета основных характеристик и параметров одноступенчатого РИА радиального типа. Этот тип аппаратов целесообразно использовать для гидромеханической и кавитационной обработки маловязких жидкостей и слабоконцентрированных тонкодисперсных суспензий.

В основе метода расчета параметров и характеристик одноступенчатого радиального РИА лежит нестационарное уравнение Бернулли, которое с достаточной для инженерной методики точностью описывает гидродинамические закономерности потока жидкости в канале статора – основной рабочей зоне аппарата. Как правило, в инженерных методиках избегают использования дифференциальных уравнений и сложных многокритериальных зависимостей. Тем не менее гидродинамические параметры РИА целесообразно определять с применением нестационарного уравнения Бернулли, так как это уравнение учитывает основные параметры аппарата и жидкости. Современная компьютерная техника и прикладные программные продукты позволяют реализовать этот метод расчета с высокой точностью и небольшими затратами времени и ресурсов.

На основе зависимостей скорости и ускорения потока жидкости от времени можно определить импульсное давление и расход жидкости в канале статора. Импульсное давление является мерой степени воздействия на обрабатываемую жидкость. По импульсному давлению можно рассчитать энергию импульса давления и интенсивность акустического излучения, генерируемого в канал статора. Анализ соотношений количества каналов в роторе и статоре и их геометрических параметров показал, что наибольшая амплитуда импульсного давления получается при равном количестве и равномерном расположении каналов, одинаковом диаметре или одинаковых значениях ширины и высоты каналов в роторе и статоре.

Эксплуатационные затраты для эффективного функционирования аппарата в основном зависят от потребляемой энергии и от энергии, расходуемой на подачу жидкости под давлением в РИА. Внешний насос, нагнетающий жидкость под давлением в РИА, позволяет увеличить производительность аппарата и амплитуду импульса давления.

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. Поэтому при расчете мощности аппарата можно изменять только конструктивные и геометрические параметры РИА. Для инженерной методики расчета мы предлагаем использовать эмпирическую формулу, которая учитывает как геометрические, так и режимные параметры аппарата.

При расчете и проектировании РИА необходимо стремиться минимизировать потребляемую мощность, увеличить значение амплитуды импульсного давления 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, расходу и мощности.

На основе анализа влияния конструктивных и режимных параметров на изменение основных гидродинамических характеристик РИА определены следующие закономерности:

- при увеличении зазора увеличивается расход, уменьшаются амплитуда импульса давления и потребляемая мощность;
- при увеличении радиуса ротора увеличиваются расход, амплитуда импульса давления и мощность;

- при увеличении ширины канала увеличиваются расход и амплитуда импульса давления, уменьшается потребляемая мощность;
- при увеличении длины каналов ротора уменьшаются расход и амплитуда импульса давления;
- при увеличении высоты каналов увеличиваются расход, амплитуда импульса давления и потребляемая мощность;
- при увеличении угловой скорости вращения ротора увеличиваются расход, амплитуда импульса давления и потребляемая мощность;
- при увеличении статического давления в полости ротора увеличиваются расход и амплитуда импульса давления.

Современные компьютеры и информационные технологии позволяют автоматизировать методы расчета любого оборудования, в том числе и роторных импульсных аппаратов. Одним из вариантов применения компьютерных технологий в автоматизации расчетов является описанная в этой книге компьютерная система расчета роторного импульсного аппарата и визуализации гидродинамических параметров потока жидкости, оформленная в виде программного продукта (Свидетельство № 2009614517 о регистрации программы для ЭВМ (РФ)). Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа. Свидетельство № 2010612236 о регистрации программы для ЭВМ (РФ). Программа расчета полей скоростей и давлений в каналах роторного импульсного аппарата).

Применение точных методов расчета основных характеристик РИА позволит их успешно конструировать, изготавливать и применять для интенсификации различных химико-технологических процессов в жидкостях. Авторы надеются, что описанные в этой книге подходы по расчету роторных импульсных аппаратов будут способствовать их внедрению в промышленность.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РОТОРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ АППАРАТАХ	12
1.1. Анализ методов интенсификации химико-технологических процессов .....	12
1.2. Интенсификация химико-технологических процессов в роторных импульсных аппаратах .....	16
1.2.1. Интенсификация процессов диспергирования и гомогенизации суспензий .....	19
1.2.2. Интенсификация процесса эмульгирования .....	21
1.2.3. Интенсификация массообменных процессов .....	22
1.2.4. Деструкция вещества при импульсном кавитационном воздействии .....	26
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1 .....	37
2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА .....	53
2.1. Классификация роторных импульсных аппаратов .....	53
2.2. Анализ методов расчета основных характеристик роторного импульсного аппарата .....	58
2.3. Методика расчета характеристик роторного импульсного аппарата радиального типа .....	67
2.3.1. Определение кинематических и динамических харак- теристик потока жидкости в РИА (скорость, ускорение, давление, энергия импульса, интенсивность излучения, расход жидкости) .....	67
2.3.2. Расчет расхода жидкости и мощности с учетом влияния вязкости и плотности жидкости при вращении ротора .....	76

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2 .....	84
3. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА .....	89
3.1. Расчет характеристик потока жидкости в РИА на основе численного решения уравнения Бернулли .....	89
3.2. Расчет характеристик потока жидкости на основе компьютерного моделирования потоков в системе ANSYS	97
3.3. Анализ результатов расчета основных характеристик роторного импульсного аппарата .....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 3 .....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	143

Научное издание

ПРОМТОВ Максим Александрович  
СТЕПАНОВ Андрей Юрьевич  
АЛЕШИН Андрей Владимирович

# МЕТОДЫ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА

Монография

Редактор Л. В. Комбарова  
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

ISBN 978-5-8265-1442-9



Подписано в печать 19.08.2015.

Формат 60×84 / 16. 8,6 усл. печ. л.

Тираж 120 экз. Заказ № 357

Издательско-полиграфический центр  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

Тел. 8(4752) 63-81-08;

E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru