

На правах рукописи

**БАДИКОВ ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ**

Специальность 05.17.08  
«Процессы и аппараты химической технологии»

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

УФА 2002

Работа выполнена в научно-исследовательском технологическом институте гербицидов и регуляторов роста растений Академии наук Республики Башкортостан.

Научный консультант: д-р техн. наук, профессор Р.Б. Валитов

Официальные оппоненты: д-р техн. наук Э. Г. Теляшев  
д-р техн. наук, профессор Ф.Ш. Хафизов  
д-р техн. наук, профессор В.Ф.Шарафутдинов

Ведущее предприятие: Институт механики УНЦ РАН

Защита состоится «    » \_\_\_\_\_ 2002 года в \_\_\_\_ ч на заседании диссертационного совета Д 212.289.03 при УГНТУ по адресу: 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук

Абдульминев К.Г.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность проблемы**

Основной чертой научно-технического прогресса в развитом промышленном обществе является переход на преимущественно интенсивный путь развития производства.

Выделяют несколько направлений интенсификации. Среди них выделяют физическое воздействие на вещество и течение процессов .

Арсенал таких воздействий содержит и традиционные методы (температура, давление, характер движения потока среды и т.п.), и сравнительно новые пути ускорения процессов. К последним относится широко комментируемый метод ультразвукового (УЗ) воздействия .

Глубокая взаимосвязь микро- и макро уровней УЗ воздействия на рабочие среды инициирует такие эффекты, достижение которых практически невозможно никакими другими физическими методами. Относительная несложность их возбуждения и достаточно высокий потенциал управляемости давно привлекал внимание промышленной химии к этому физическому методу.

Работами Вуда и Лумиса , Ричардса , Маринеско, Зольнера и Бонди метод УЗ воздействия был введен в практику научных исследований. Не прекращающаяся с тех пор экспериментальная и опытно-промышленная практика неизменно показывала чрезвычайную эффективность этого метода. Отсюда тем более парадоксально, что в широкой промышленной практике эти методы не нашли должного применения. Увлеченность магнитострикционным, пьезоэлектрическим, электромагнитным методами возбуждения УЗ колебаний существенно затормозило продвижение этого метода в промышленность.

На начало 70-х годов прошлого столетия приходится резкий подъем интереса к изучению УЗ воздействия, генерируемого излучателями типа «ротор-статор» (такие излучатели далее называются гидроакустической техникой (ГА-техникой) или аппаратами гидроакустического воздействия (АГВ). Но эти сведения носят преимущественно фрагментарный и феноменологический характер.

Такое состояние может объясняться двумя причинами: во-первых, фундаментальные исследования воздействия УЗ поля на вещество не имели прямой связи с промышленной практикой, и, во-вторых, нет отчетливой, ясной, легко обозримой и достаточно универсальной концепции создания ГА-техники.

Разработка такой концепции, создание классификации процессов и аппаратов промышленных технологий в условиях гидроакустического воздействия и расширение на этой базе потенциальной сферы

использования ГА техники в промышленности представляется актуальной проблемой.

### **Цель работы**

Осуществление комплексного обобщения техники гидроакустического воздействия и технологии ее применения, разработка научно обоснованных технических и технологических решений, использование которых существенно расширяет потенциальную сферу применения ГА-техники в конкретных технологических условиях типовых процессов промышленных технологий.

В связи с формулой цели решались **частные задачи** исследований:

- системология гидроакустической техники и технологии;
- осуществление функционально-структурного анализа конструкции гидроакустической техники;
- выявление точек приложения и механизмов ГА воздействия;
- оценка режимов работы аппаратов системы «ротор-статор», в том числе частотно-амплитудных характеристик аппаратов гидроакустического воздействия; стробирования импульсов давления в одно- и много роторных аппаратах;
- выявление принципов повышения эффективности преобразования энергии в аппаратах гидроакустического воздействия оптимизацией размера зазора между ротором и статором модулятора; обоснование геометрических размеров камеры озвучивания;
- управление частотно-амплитудным спектром колебаний звукового давления в полостях аппарата соотношением размеров элементов перфорации в роторе и статоре и их числом;
- профилирование рабочих колес аппаратов гидроакустического воздействия;
- получение дисперсных систем в аппаратах гидроакустического воздействия;
- оптимизация количества энергии, передаваемой обрабатываемой среде, в гидроакустической технике;
- оценка особенностей течения газожидкостных потоков в полостях рабочего колеса аппарата гидроакустического воздействия
- получение газожидкостных систем в аппаратах гидроакустического воздействия;
- выявление пространственно-временных метрик «элементарных» технологических процессов;
- создание системной классификация гидроакустической техники и технологии.

### **Научная новизна**

1. Осуществлено комплексное обобщение практики применения техники и технологии гидроакустического воздействия на основе системного анализа гидроакустических процессов и аппаратов;
2. Разработаны основы теории конфигурирования звукового поля в ГА технике с одной («теория стробирования») и несколькими («теория ритмики») парами «ротор-статор» модулятора;
3. Обнаружено явление самоорганизации в дисперсных продуктах как следствие процессов диспергирования - агрегирования. Предложено объяснение этого явления, на основе которого выработан принцип оптимизации количества энергии, необходимого для получения тонкодисперсных продуктов;
4. Разработаны основы теории диспергирования в АГВ на основе концепции зонного разрушения, учитывающей особенности силового воздействия в зонах стесненного удара, высоких сдвиговых напряжений и в облаке кавитационных пузырьков;
5. Разработаны основы теории ГА техники при получении газожидкостных продуктов. Выявлены условия устойчивой работы АГВ с газонасыщенными средами и предложен механизм получения газовых эмульсий с помощью АГВ;
6. Разработана системная классификация техники и технологии гидроакустического воздействия, позволяющая осуществлять выбор конструктивных особенностей АГВ целевого технологического назначения.

Новизна результатов защищена 14 авторскими свидетельствами и патентами РФ.

### **Практическая ценность работы**

Практические результаты получены в лабораторных, пилотных, опытно-промышленных и промышленных испытаниях.

Непосредственно в производственную практику приняты:

- получение суспензионных препаративных форм пестицидов;
- крашение полимерных материалов в массе;
- приготовление рабочих жидкостей пестицидов перед их использованием на сельскохозяйственных полях;
- производство эпоксидных красок и нитроэмалей;
- водно-щелочное дегидрохлорирование в производстве трихлорбензолов;
- синтез симметричных триазинов;
- на машиностроительном производстве при изготовлении ГА техники;
- в фармацевтическом производстве при изготовлении иодных растворов;

- в пищевой промышленности в процессе гидратации прессового подсолнечного масла.

### **Апробация работы**

Основные результаты исследований докладывались на симпозиумах, конференциях, семинарах, совещаниях по вопросам акустической кавитации и применении ультразвука в технологических процессах в 1985-2000 г. в Москве, Санкт-Петербурге (Ленинград), Славском, Уфе.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано более 40 работ, из них 1 монография; 14 авторских свидетельств СССР и патентов РФ.

### **Структура диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 473 наименования. Работа изложена на 453 страницах машинописного текста, содержит 79 таблиц и 134 рисунка.

### **Основное содержание работы**

1. В **первой главе** рассмотрены вопросы комплексного обобщения практики применения техники и технологии гидроакустического воздействия на основе системного анализа гидроакустических процессов и аппаратов.

В работе изучаются два объекта: *ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА* и *ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ*, которые имеют единый связующий признак – *ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ*. На основании разработанной автором методологии системотехнического анализа технологии и техники ГА воздействия получены:

- морфологические модели, позволяющие определить минимальный набор функциональных элементов ГА-техники и пути их совершенствования.
- функциональные модели, идентифицирующие типовые и предельные возможности ГА-техники и представляющие возможность подойти к пониманию механизмов осуществления процессов ГА-технологии.
- энергетические модели, выявляющие места наибольших потерь энергии в процессе ее преобразования от входа в аппарат до продуктивного использования и, на этой основе, выявить «узкие» места конструкции ГА-техники.
- параметрические модели, которые составили основу программы декомпозиции объектов исследования для создания частных моделей.
- информационные модели, полученные в результате наукометрического анализа потоков информации, что позволило идентифицировать объективное состояние объектов исследования тенденции их развития.

2. **Вторая глава** содержит разработку научно обоснованных технических решений, реализация которых в конструкциях АГВ дает возможность расширить сферу их технологического применения, повысить

гибкость управления параметрами ГА техники и обеспечить оптимальное использование энергии гидроакустического воздействия.

### 2.1 Режимы работы гидроакустической техники

На основании экспериментальных исследований гидроакустических параметров модуляторов различных конструкций выявлено, что в зависимости от кинематики совмещения прорезей ротора и статора достаточно отчетливо проявляются три режима работы: гидромеханический смеситель, гидромеханический пульсатор и акустический излучатель. Построение математической модели режимов работы позволило выявить ведущий конструктивный параметр аппарата, разграничивающий эти режимы, названный «дугой накопления» ( $I_1$ ), смысл которого длина дуги, сохраняющая состояние взаимного перекрытия прорезей ротора и статора модулятора их телами. При величине дуги накопления меньше 0 аппарат работает в режиме обычного смесителя (мешалки). При величине этого параметра равным нулю возникают гидромеханические пульсации истекающего через перфорации потока и при дальнейшем увеличении дуги накопления создаются условия перехода в режим генерации акустических эффектов. Используя отношение длины дуги ( $I_1$ ) и ширины прорезей в роторе и статоре модулятора ( $a_i$ ) показано, что режим устойчивой генерации акустических колебаний достигается при условии  $I_1/a_i \geq 2 = k_p$ ; ( $i = p, c$ ). Таким образом был определен первый характеристический параметр типологизации ГА-техники.

### 2.2. Конфигурирование звукового поля («Теория стробирования»)

Анализ многочисленных параметрических моделей частотных характеристик генерируемого ГА-техникой поля показал, что этот вопрос далеко не закрыт. Достаточно сказать, что решая его появилось множество теорий звукообразования в подобных аппаратах (механическая Виллемса, акустическая Фридмана, гидромеханическая Жуковского-Юдаева и прочие). Столь же многочисленно представительство математических закономерностей, описывающих частоту колебаний, возбуждаемых подобными аппаратами. Принимая во внимание фундаментальность этого вопроса автором разработаны основы теории конфигурирования звукового поля в ГА технике, названной «Теорией стробирования» (от англ. «посылать избирательные импульсы»).

Получение адекватного описания частотных характеристик АГВ потребовало создание строгой теории динамики совмещений прорезей ротора ( $Z_r$ ) и статора ( $Z_s$ ) модулятора. Эта задача рассматривалась как проблема совмещения углов правильных многоугольников при вращении одного из них относительно другого.

На основе известных выводов целочисленной математики и теории чисел и доказанных автором теорем, касающихся ранее не обсуждавшихся

вопросов совмещений углов правильных многоугольников было получено обобщенное уравнение схем совмещений в форме уравнения Евклида.

Решением этого уравнения с учетом специфических условий, полученных в результате математического анализа динамики совмещений углов показано, что принципиальная множественность числа возможных вариантов совмещений элементов перфораций модулятора сводится к четырем схемам. Это схемы: с неподвижным импульсом (СНИ), с осциллирующим импульсом (СОИ), с противоположенным импульсом (СПИ) и со спутным импульсом (ССИ). В результате использования выводов созданной теории разработаны алгоритмы конструкторского расчета схем совмещений – определение соотношения числа перфораций в роторе и статоре модулятора в зависимости от заданной конфигурации совмещений и поверочного расчета, т.е. определение конфигурации совмещений в зависимости от соотношения числа элементов перфорации в модуляторе и возможность однозначного определения частотных параметров генерируемого АГВ поля.

Экспериментальная проверка теории осуществлялась на стенде электродинамического моделирования схем совмещений и в натуральных экспериментах путем фотофиксации следов импульсов давления лабораторных АГВ различной конфигурации модуляторов. Выявлено, что ошибка определения частоты колебаний не превышает 10-15% на всем поле исследованных факторов (см. табл.1).

Таблица 1.

### Частотные характеристики АГВ

( $f_0$  – основная частота;  $f_1$  – частота первой субгармоники)

| $Z_r/Z_s$ | Частота, Гц |       |       |       | Относительная |       |
|-----------|-------------|-------|-------|-------|---------------|-------|
|           | теория      |       | факт  |       | ошибка, %     |       |
|           | $f_0$       | $f_1$ | $f_0$ | $f_1$ | $f_0$         | $f_1$ |
| 1         | 2           | 2     | 3     | 4     | 4             | 6     |
| 30/18     | 2250        | 6750  | 2550  | 7500  | 12            | 10    |
| 30/12     | 2070        | 4140  | 2400  | 4600  | 14            | 10    |
| 24/12     | 2160        | 2160  | 2500  | 2500  | 14            | 14    |
| 24/18     | 1560        | 4680  | 1620  | 5000  | 4             | 6     |
| 24/15     | 1416        | 7080  | 1560  | 7500  | 9             | 6     |

Экспериментально полученные конфигурации звукового поля (последовательность всплесков импульсов давления и их величина) соответствовали теоретическим представлениям.

Этим циклом исследований были выработаны следующие характеристические параметры типологизации - параметр режима модуляции среды, отражающий существо схем совмещений (СНИ, СОИ, СПИ и ССИ), который определяется формулами схем совмещения. Среди них различаются:

немодулированный сигнал – СНИ. Выбор из условия:  $Z_r/Z_s=N$ ;  $N=1, 2, \dots$ ;

осциллирующая модуляция – СОИ. Выбор из условия: а)  $Z_r=2n$ ; б)  $Z_r=k$ ; в)  $\text{НОД}(2,k)=1$ ;

конфигурационная модуляция – СПИ, ССИ. Выбор из условий:

$$\begin{aligned} \text{СПИ: } Z_s/2 < N_s < Z_s \\ Z_r/2 < N_r < Z_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ССИ: } 0 < N_s < Z_s/2 \\ 0 < N_r < Z_r/2 \end{aligned}$$

и параметр, связанный с количеством энергии выносимой потоком среды в пространство камеры озвучивания - параметр использования остаточной энергии импульса потока, истекающего из прорези статора ( $k_{\text{оп}}$ ). Последний есть показатель степени функции  $P_{\text{зв}} = (Q_{\text{оп}}^k)$ , где:  $P_{\text{зв}}$ - звуковое давление, МПа и  $Q$  – расход, м<sup>3</sup>/сек. Оказалось, что для СНИ и СОИ  $k_{\text{оп}} \approx 1$ , а для СПИ и ССИ  $k_{\text{оп}} \gg 1$ .

Естественным развитием теории стробирования стало ее применение к много роторным АГВ, т.е. к таким конструкциям, в которых более одной пары «ротор-статор» размещены коаксиально в одном корпусе. В этих аппаратах возникает множество новых конфигураций совмещений, подчиняющихся некоторым единым ритмическим последовательностям. Поэтому приложение основ теории стробирования к этим последовательностям названо теорией ритмики. В много роторных аппаратах появляется возможность управлять не только конфигурацией звукового поля, но и изменять профиль давления по радиальной координате рабочих органов и через это создавать особые условия управления кавитационными эффектами по ходу продвижения технологического массопотока. Расширен перечень характеристических параметров типологизации на много роторные аппараты – параметр режима работы многоступенчатых аппаратов ( $\psi$ ). Данный параметр разграничивает режимы работы аппаратов, имеющих несколько пар «ротор-статор» ( $M$ ). При  $M > 2$  необходимо различать: режим полной прозрачности аппарата:  $k_r^1$  и  $k_r^2 < 2$ ;  $\psi < k_r^1 \phi_1 + k_r^2 \phi_2$ ; режим с ритмикой

перекрытия:  $\psi > k_r^1 \phi_1 + k_r^2 \phi_2$ ;  $k_r^{1(2)} > 2$  и  $k_r^{2(1)} < 2$ ; режим с полным перекрытием:  $\psi > k_r^1 \phi_1 + k_r^2 \phi_2 + m\alpha$ ;  $k_r^{1(2)} > 2$  и  $k_r^{2(1)} < 2$ ;  $m > 1,5\text{mm}$ .

Для количественной оценки амплитудного спектра гидроакустических колебаний, формируемого модуляторами с различными схемами совмещений и перекрытий прорезей вводятся характеристические параметры модуляции потока: общее количество энергии, переносимое колебательным процессом (сумма амплитуд 1-х 10-и гармоник); количество энергии, запасенной основной гармоникой колебаний, так называемая монохромность излучения (значение амплитуды основной гармоники колебаний) и их зависимость от основных геометрических параметров модулятора (размеров перфораций в роторе ( $a_p$ ) и статоре ( $a_c$ ) и величины «дуги накопления»).

Исследования проводились методом вычислительного эксперимента, в котором изучалась динамика изменения переменного проходного сечения модулятора в форме его разложения в ряд Фурье с использованием приемов спектрального анализа. Показано, что геометрические параметры модулятора позволяют управлять качеством и количеством энергии, переносимой колебательным процессом в ГА-технике через ширину частотно-амплитудного спектра (параметр концентрированности излучения -  $k_n = a_c/a_p$ ), перераспределения энергии по гармоникам спектра (параметр сепарации гармоник -  $k_r = Z_c/n$ ) и островершинности частотно-амплитудного спектра (параметр эффективности преобразования энергии  $k_m = I_1/a_p$ ).

### 2.3. Увеличение энергопродуктивности

Анализ энергетической модели показал, что наибольшие потери энергии в процессе преобразования энергии в ГА-технике связан с трансформациями одного вида энергии в другие и с особенностями работы собственно АГВ.

Исследованиями показано, что оптимальным зазором надо считать величину  $h = \sqrt{(6\nu\phi_0/\omega)}$ , где:  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости;  $\phi_0 = 2\pi n/Z_r Z_s$  - угол совмещений;  $\omega$  - частота вращения ротора,  $\text{с}^{-1}$ . Значение  $h$  - следующий характеристический параметр типологизации.

Моделированием камеры озвучивания, которое заключалось в построении решения волнового уравнения в цилиндрических координатах с граничными условиями, соответствующими реальной конструкции сирены гидродинамической (СГД), показана адекватность подхода автора экспериментальным результатам, найденным Юдаевым и Варламовым. Таким образом был сформулирован характеристический параметр работы камеры озвучивания, отражающий эффективность преобразования энергии в камере озвучивания. Он определяется собственной частотой колебаний камеры:

$$f = \frac{C}{k_{rez} (R_k^i - R_k^n)}, \text{ где } C - \text{ скорость звука в среде,}$$

заполняющей камеру, м/с и  $R_k$  – радиус камеры, м (i, n – «внутренний», «наружный»). При  $k_{rez}=4$  обеспечиваются условия резонанса в камере озвучивания – оптимальный режим. При иных значениях этого параметра имеет место искаженный режим преобразования энергии в камере озвучивания.

Исследованиями конструкций роторов модулятора с различными профилями лопаток лопаточного механизма показано, что все это многообразие целесообразно свести к трем основным типам: насосным лопаткам (эвольвентный профиль), тангенциальному каналированию (прямолинейный профиль с ненулевым углом входа потока в лопаточный механизм) и нормальным каналированием (прямолинейный профиль с нулевым углом входа потока в лопаточный механизм). Такие различия конструкций лопаточного механизма вовлечены в перечень характеристических параметров типологизации ГА-техники как параметра эффективности преобразования энергии в АГВ как насосного агрегата ( $k_{\text{нбп}}$ ). При лопатном исполнении обеспечивается мягкий насосный режим с круто падающей расходно-напорной характеристикой, умеренным напором и расходом. При радиальном каналировании рабочего колеса увеличивается подача АГВ при таких же (или почти таких же) значениях напора – высокообъемные АГВ. При тангенциальном каналировании увеличивается напор АГВ, а подача остается неизменной или слегка увеличивается – высоконапорные АГВ.

Приведенные характеристические параметры типологизации ГА-техники использованы в дальнейшем для построения классификации технологии и техники ГА воздействия.

3. В **третьей главе** приведены основные результаты исследований по научно-техническому обоснованию практического использования гидроакустической техники в ряде типовых процессов получения многофазных продуктов – дисперсий типа жидкость-твердое, жидкость-жидкость, прямых и обратных газовых эмульсий, что составляет основу подавляющего большинства типовых промышленных процессов, в которых целесообразно применение АГВ.

### 3.1. Получение суспензий и эмульсий

Исследован процесс получения дисперсных систем (эмульсий, суспензий) в полостях АГВ на базе концепции зонного механизма разрушения, предложенный автором. Используя математический аппарат теории случайных процессов показан механизм разрушения дисперсных частиц в условиях стесненного удара, в зонах с высокими сдвиговыми

напряжениями и в облаке коллапсирующих кавитационных пузырьков. Результаты теоретических рассуждений доведены до расчетных формул, позволяющих прогнозировать дисперсный состав продукта на выходе из аппаратурного узла диспергирования как с внешне циркуляционным контуром, так и при последовательной работе емкостного реактора и АГВ.

Рассматриваются независимые ( в смысле физико-химического взаимовлияния) зоны. В каждой зоне разрушение происходит по своему индивидуальному механизму. Для каждого способа обработки суспензии (варианты: «из емкости в емкость» (1) и «замкнутая циркуляция» (2)). Выявлены особенности математического описания этих вариантов:

1 – способ «из емкости в емкость»:

$$F_{i+1}(r) = (1 - \varphi_2) \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \rho(r) dr + \varphi_2 \{ [1 - e^{-K_1 \tau (1 - \varphi_i)}] \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \rho(r) dr + K_2 [1 - e^{-K_1 \tau (1 - \varphi_i)}] \int_{r_{\min}}^{r_p} B(r) dr \} \quad (1)$$

где:  $i = 1, 2, \dots$  кратность обработки;

$\varphi_i$  – доля разрушенных в  $i$ -ом проходе частиц;

$K_1, K_2$  – инварианты;

$\rho_c$  – плотность суспензии;

$\rho(r)$  – плотность распределения частиц по массе в суспензии.

2 – способ с «внешнециркуляционным контуром»:

$$N_{i+1}^{sr} = 0,632 N_i^{sr} \quad (2)$$

где:  $N^{sr}$  – среднее число частиц в единице объема суспензии.

Уравнения (1) и (2) являются итоговыми моделирующими выражениями получения дисперсных систем в аппаратах типа АГВ в условиях стесненного удара.

Экспериментальную проверку моделирующих соотношений проводили на опытно-промышленной установке получения суспензионных препаративных форм пестицидов путем обработки суспензии по обоим техническим приемам организации многократного прохода потока через АГВ. Результаты такой проверки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение результатов диспергирования в АГВ во внешне циркуляционном контуре (индексы 2) и при перекачке из емкости в емкость (индексы 1)

| i     | $d_1^H$ | $d_1^K$ | $d_2^H$ | $d_2^K$ | $K=\Delta d_1/\Delta d_2$ | $(K)^{-1}$ |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------------------------|------------|
| 0-2   | 6,6     | 3,3     | 6,6     | 4,5     | 3,3/2,1                   | 0,632      |
| 2-4   | 4,5     | 3,1     | 4,5     | 3,7     | 0,8/1,4                   | 0,571      |
| 4-6   | 3,7     | 3,05    | 3,7     | 3,3     | 0,4/0,65                  | 0,615      |
| 6-8   | 3,3     | 3,0     | 3,3     | 3,1     | 0,2/0,3                   | 0,666      |
| 8-10  | 3,1     | 2,95    | 3,1     | 3,0     | 0,1/0,15                  | 0,666      |
| 10-12 | 3,0     | 2,9     | 3,0     | 2,95    | 0,05/0,1                  | 0,5        |

Среднее значение: 0,609

Как видно из результатов эксперимента результат диспергирования по схеме 1 на 40% выше, чем по схеме 2. Это практический вывод. Кроме того, экспериментально найденная величина (0,609) достаточно близка к теоретическому значению (см. уравнение 2), что может служить экспериментальным подтверждением адекватности моделирующих соотношений.

Основой математического описания кавитационно-акустического диспергирования составили элементы математической теории эволюции и, в частности, теории взаимодействия двух конкурирующих «популяций»:  $N_1$ - «популяции» частиц внутренней фазы дисперсии и  $N_2$  - «популяции» кавитационных пузырьков.

Увеличение численности  $N_1$  происходит в результате встреч элементов из  $N_1$  и  $N_2$ , т.е. пропорционально их численности. Уменьшение численности  $N_1$  пропорционально числу встреч элементов из этой «популяции», т.е.  $N_1^2$ . Увеличение численности  $N_2$  происходит независимо от процессов в зоне разрушения и определяется лишь гидродинамическими условиями возбуждения кавитации. Уменьшение же  $N_2$  происходит как вследствие взаимодействия с элементами  $N_1$ , так и независимо от этих встреч, т.е. является аддитивной функцией.

Схему взаимодействия можно изобразить в виде следующего цепного процесса:

|                                   | кинетические параметры |          |
|-----------------------------------|------------------------|----------|
| стадия 1 – индуцирование          | $\lambda_2 f(t)$       | $N_2^*$  |
| стадия 2 – развитие $N_2^* + N_1$ | $\lambda_1$            | $nN_1^*$ |
| стадия 3 – рекомбинация $2N_1^*$  | $\mu_1$                | $N_1$    |
| стадия 4 – обрыв $N_2^*$          | $\mu_2$                |          |

В данной схеме на первой стадии с интенсивностью  $\lambda_2$  происходит генерирование потока кавитационных пузырьков. Здесь  $f(t)$  некоторая функция времени, задающая импульсность данного процесса. Стадия 2

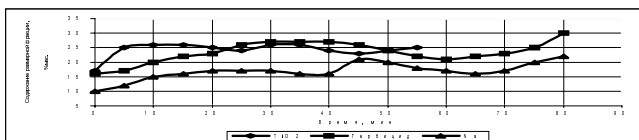
отражает процесс кавитационно-акустического диспергирования, стадия 3 – процесс агрегирования и стадия 4 – процесс схлопывания кавитационных пузырьков, не участвующих в стадии 2.

В соответствии с выписанной схемой можно получить систему инфинитезимальных интенсивностей увеличения и уменьшения численности  $N_1$  и  $N_2$  :

- для  $N_1$ : увеличения –  $\lambda_x = \lambda_1 * x * y$ ; уменьшения –  $\mu_x = \mu_1 * x^2$
- для  $N_2$ : увеличения –  $\lambda_y = \lambda_2 * f(t)$ ; уменьшения –  $\mu_y = (\mu_2 + \lambda_1 * x) * y_1$

где:  $x, y$  – число частиц дисперсной фазы и кавитационных пузырьков соответственно.

Используя простейшие предположения о качестве исследуемых процессов можно получить условия равносильные двумерному процессу рождения и гибели, что позволяет записать для него систему уравнений Колмогорова:



Используя приемы качественного анализа дифференциальных уравнений получен продуктивный алгоритм для вычисления динамики изменения числа частиц и кавитационных пузырьков в исследуемых множествах.

С целью оценки полученной модели проведен вычислительный эксперимент с исходными данными близкими к натурным условиям.

На рисунках 1 и 2 изображены результаты этого эксперимента в виде изменения числа частиц твердой фазы в суспензии и числа кавитационных пузырьков в соответственно. Оба рисунка в достаточной для инженерной практики подтверждают достоверность предлагаемой модели для описания реального процесса диспергирования в условиях акустического воздействия. Действительно, с течением времени в результате взаимодействия частиц твердой фазы с кавитационными пузырьками происходит рост числа частиц, вследствие их разрушения и темп этого роста сдерживается процессами агрегирования (см. рис.1). В тоже время, с некоторого момента времени, в силу непрерывного генерирования пузырьков и их исчезновения, число пузырьков остается практически постоянным (см. рис 2).

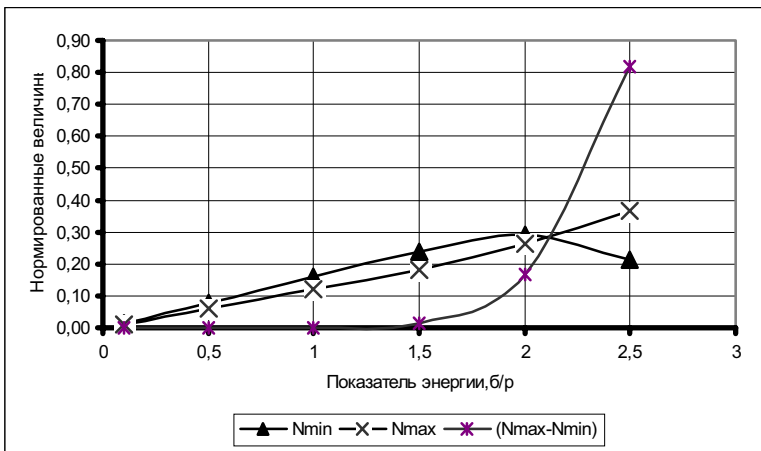


Рис. 1. Изменение числа частиц во времени

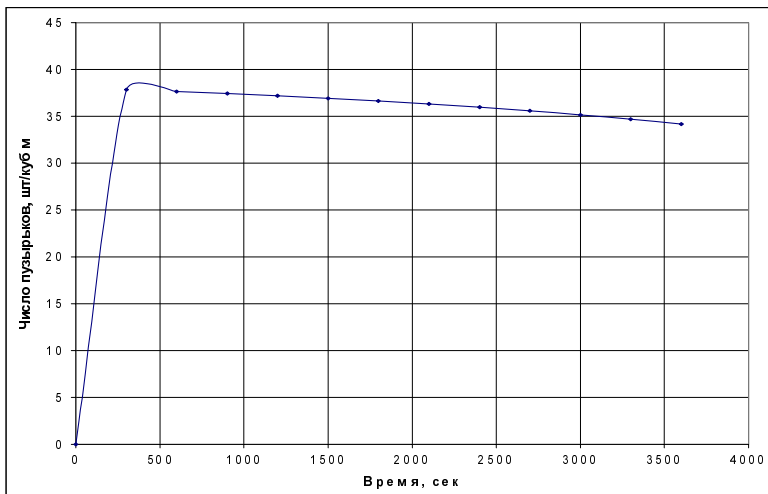


Рис.2. Изменение числа пузырьков во времени

### 3.2. Оптимизация затрат энергии на диспергирование

При изучении процессов диспергирования неоднократно наблюдалась периодическая изменчивость дисперсного состава продукта в распределении частиц внутренней фазы по размерам в разнообразных суспензиях (диоксид титана в парфюмерном масле, гербицидная композиция, металлический натрий в кумоле и др.) - см. рис.3.

Предлагается следующий механизм, позволяющий объяснить эти экспериментальные факты: на начальных стадиях диспергирования, когда большая часть вносимой в среду энергии расходуется на уменьшение размеров частиц, с одной стороны, и число мелких «осколков» еще мало, с другой, в эксперименте наблюдается гладкое повышение степени дисперсности. На последующих стадиях, когда выработаны физико-химический (особенности взаимодействия внутренней и внешней фаз конкретной дисперсии) и энергетический (количество подводимой для диспергирования энергии, обеспечивающей такое взаимодействие) ресурсы применительно к конкретной системе, что в эксперименте наблюдается как момент выхода на плато кинетической кривой, в объеме дисперсии, во-первых, сохраняется количество передаваемой энергии и, во-вторых, большая часть внутренней фазы уже имеет размер «осколков», поэтому интегральное увеличение степени дисперсности невозможно при одновременно созданных условиях активного агрегирования этих «осколков».

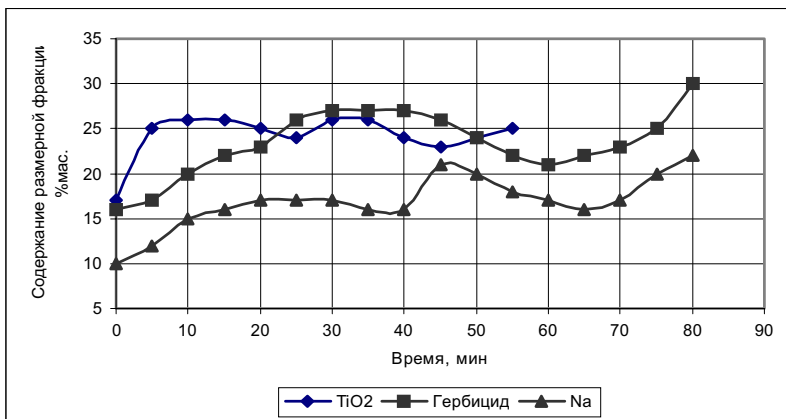


Рис. 3. Финишные участки экспериментальных кривых кинетики диспергирования суспензий.

Далее, при накоплении достаточного количества вторичных агрегатов вновь «включается» процесс диспергирования; далее совокупность этих

процессов повторяется – таким образом и наблюдаются осцилляции дисперсности. Здесь важно отметить тот факт, что часть привносимой энергии расходуется не только на достижение конечной цели, но и на возбуждение и поддержание паразитных осцилляций – это практическое замечание. Не менее важен и научно-познавательный аспект: мы наблюдаем ранее не отмечавшееся явление кооперативного поведения много частичных дисперсных систем в распределенных силовых полях. Подобные факты отмечались в биологических, химических, экологических системах. Необходимо отметить, что в определенных условиях такое поведение свойственно и дисперсным системам, что отражает общенаучный характер этого явления.

Очевидно, что процесс разрушения частиц моночастичный, а агрегирования, как минимум, бичастичный (в общем виде – поличастичный). Тогда кинетическая модель изменения числа частиц в зоне диспергирования может быть представлена следующим дифференциалом:

$$\frac{dN_t}{dt} = \lambda \times N_t - \mu \times N_t^2$$

где  $t$  – время.

Методом анализа размерностей (могут быть применены и другие технические приемы идентификации, но применяли именно этот метод) можно показать, что:

$$\lambda = \lambda' \times \gamma$$

$$\mu = \mu' \times \gamma$$

где:  $\lambda'$  и  $\mu'$  - коэффициенты пропорциональности

$\gamma$  – напряжение сдвига в зоне диспергирования. Здесь этот параметр играет роль количества вносимой энергии в зону диспергирования и определяется в зависимости от аппаратурного оформления по соответствующим формулам.

Полученная модель была использована для вычислительного эксперимента, который заключался в расчете  $N_t$  в зависимости от  $\lambda$ .

Результаты эксперимента представлены на рисунке 4, которые показывают качественную идентичность поведения кинетических кривых в эксперименте и в расчете. Из рисунка 4 видно, что при заданных физико-химических свойствах внутренней и внешней фаз дисперсии и подводимой

на диспергирование энергии уравнение модели допускает большое разнообразие решений: неизменность, плавное увеличение, увеличение с насыщением, периодическая изменчивость состава с небольшим и большим размахами.

Процедура оптимизации разрешается путем подбора таких значений параметров, которые обеспечивают решение моделирующего уравнения с минимальным размахом колебаний состава. При этом принимается во внимание неизбежность разброса в размерах частиц в любой момент времени и, именно, этот разброс мы пытаемся сделать минимальным.

Практически такую процедуру рекомендуется делать, соблюдая следующую последовательность: в экспериментальных условиях, которые значительно отличаются друг от друга по количеству вносимой в зону диспергирования энергии определяют параметры расчетного уравнения:  $\lambda$  и  $\mu$ ; далее, используя предложенное эволюционное уравнение в его дискретном виде путем вычислительных процедур в координатах « $Nt$ ,  $\lambda$ » строятся три кривые:

- 1 -  $N_{\max} = f(\lambda)$ ;
- 2 -  $N_{\min} = f(\lambda)$ ;
- 3 -  $(N_{\max} - N_{\min}) = f(\lambda)$ .

Такая процедура для выше использованных данных приведена на рис.5 в относительных величинах.

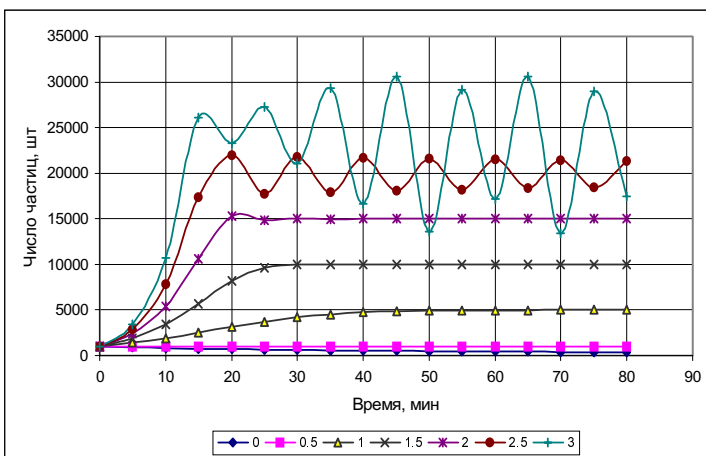


Рис. 4. Результаты вычислительного эксперимента

На рис.5 в точке пересечения кривых выявляется значение энергии ( $\lambda$ ), которое обеспечивает одновременно максимальную дисперсность и минимальные осцилляции дисперсного состава. Именно это значение, подводимой на диспергирование энергии, следует считать оптимальным, т.к. при меньших процесс неоправданно затягивается, а при больших – ее часть растрачивается на возбуждение и поддержание паразитных осцилляций дисперсного состава.

После того как выполнена процедура идентификации значения  $\lambda$ , в соответствии с наиболее значимым механизмом диспергирования (стесненный удар, фрикционные взаимодействия, кавитационно-акустическое воздействие или другие), выбираются такие практические приемы осуществления процесса, которые способны обеспечить найденное значение кинетического параметра  $\lambda$ .

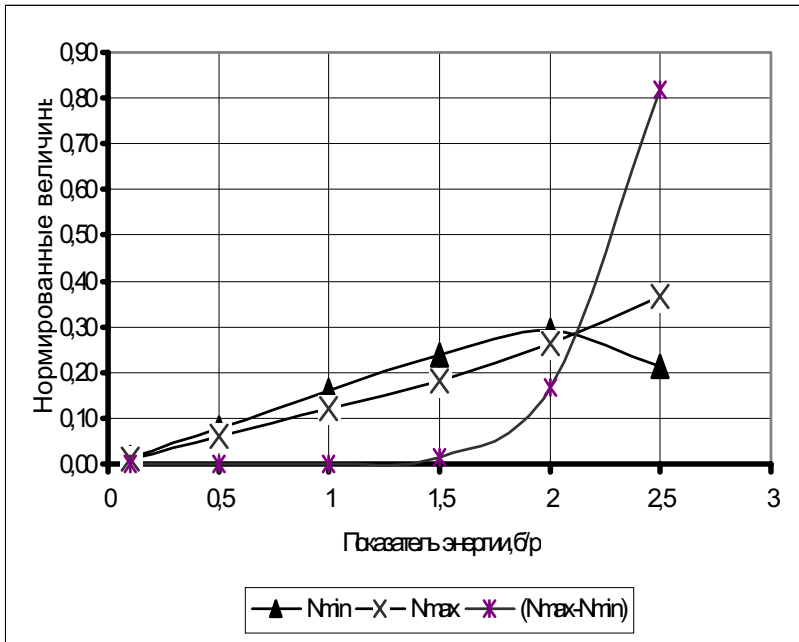


Рис. 5. Графическая процедура оптимизации количества энергии.

### 3.3. Получение газовых эмульсий

Изучены процессы получения газовых эмульсий в АГВ. Рассмотрены вопросы течения газожидкостных потоков по полостям АГВ и работу ГА техники в режиме распыла (получение газовых эмульсий). Показаны условия устойчивой работы АГВ на газожидкостных потоках с точки зрения зависания и сепарации газовой фазы в полостях рабочего колеса АГВ и особенности распыла флюида, содержащего твердую фазу.

Решая задачу движения несжимаемой сферы в жидкости в поле центробежных сил с наложением гармонической нестационарности удалось получить зависимость радиуса зависания пузырьков газовой фазы в рабочем колесе АГВ с конкретными конструктивными параметрами в зависимости от физико-химических характеристик газожидкостного потока:

$$r_3 = \frac{8,1}{nR} \sqrt{\frac{vq\rho \left( 1 + \frac{R}{\sqrt{\frac{2v}{f}}} \right) (1 + \lambda)}{h(\rho - \rho_g)}}, \quad (3)$$

$n$  – частота вращения вала привода аппарата;  $R$  – радиус газовой сферы;  $v$  – коэффициент кинематической вязкости;  $\lambda$  – газосодержание;  $\rho$  – плотность жидкой фазы;  $\rho_g$  – плотность газовой фазы;  $q$  – расход флюида;  $f$  – частота пульсационных явлений;  $h$  – высота лопаточной зоны ротора модулятора.

Сброс подачи АГВ (прекращение работы аппарата как насосного агрегата) наблюдается, если радиус зависания меньше радиуса ротора аппарата. Таким образом условием устойчивой работы ГА-техники на газожидкостных потоках становится неравенство  $r_3 < R_r$ , где  $r_3$  определяется по уравнению (3). Зависание газовых пузырьков можно ликвидировать следующими мероприятиями:

- а) уменьшая радиус газовых пузырьков;
- б) снижая частоту вращения вала привода аппарата;
- в) уменьшая высоту лопаточной части ротора АГВ, т.е. уменьшая площадь фильтрации от центра ротора к его периферии;
- г) увеличивая частоту совмещения прорезей ротора и статора;
- д) увеличивая расход жидкости (или, что тоже, уменьшая газосодержание).

Расчет по формуле (3) показывает, что при газосодержании более 0,01% по объему при самых благоприятных прочих условиях будет наблюдаться сброс подачи для всех АГВ, диаметр лопаточной зоны ротора

которых более 70 мм. Этот теоретический факт наблюдался экспериментально на жидкостях различной плотности и роторах разнообразной конструкции. Тем самым была подтверждена адекватность модели (3) и концепции теоретического подхода.

В связи с тем, что конфигурация ГА-АПЕ с АГВ во внешне циркуляционном контуре наиболее массовая и именно в такой конфигурации возможен прорыв газа через донный патрубок по вихревому шнуру, проведено уточнение величины критического заглубления донного патрубка диаметром  $d_0$  под уровень жидкости ( $h_{kr}$ ).

Обобщение экспериментальных данных проводили по известной критериальной зависимости :

$$h_{kr}/d_0 = K Fr^n ,$$

где:  $K, n$  – эмпирические коэффициенты;

$Fr = u^2/(gd_0)$  – критерий Фруда;

$u$  – скорость жидкости в придонном патрубке.

В наших экспериментах, при работе АГВ во внешне циркуляционном контуре, найдено, что прорыв газа в полость аппарата через вихревой шнур описывается критериальным уравнением вида:

$$\frac{h_{kr}}{d_0} = 0,0177 \left( \frac{u}{\sqrt{gd_0}} \right)^{2,11} ,$$

которым рекомендуется пользоваться при проектировании ГА-АПЕ с АГВ во внешне циркуляционном контуре во избежании прорыва газа в ГА-аппарат через вихревой шнур.

Осуществлено экспериментально-теоретическое исследование процесса получения газовых эмульсий посредством АГА. Задача состояла в определении среднего размера капель в факеле распыла, если волны неустойчивости инициируются выходом частиц на свободную поверхность струи и определении вероятности вхождения частиц в капли факела распыла.

Влияние гетерофазы будет заметно, если хотя бы одна частица с вероятностью равной 1 пройдет через сечение кольца струи при условии, что за время наблюдения  $t$  через все сечение струи пройдет  $X$  частиц.

Вероятность выхода частиц в сечении кольца ( $P_k$ ) определится формулой

$$P_k(t) = \frac{S_k}{S_c} X P_x(t), \quad (4)$$

где  $S_k, S_c$  – площадь поперечного сечения кольца и струи, соответственно. Условие значимости частиц на процесс распыла соответствует равенству  $P_k(t)=1$ . Тогда длина волны неустойчивости станет равной

$$\lambda_b^c = \tau u_0 \quad (5)$$

$\tau$  – промежуток времени между последовательными выходами двух частиц в сечение кольца. Эту величину можно определить из соотношения (4) с учетом  $P_k(t)=1$ :

$$1 = \frac{S_k}{S_c} X \frac{(\lambda)^X}{X!} e^{-\lambda} \quad (6).$$

В этом уравнении два неизвестных:  $t$  и  $X$ . Величину  $X$  определим из следующего соображения. Время  $\tau$  тем ближе к времени наблюдения  $t$ , чем  $P_x(t)$  ближе к своему максимуму, т.е. чем с более вероятным событием мы имеем дело. Наиболее вероятное число частиц, переносимое потоком за время  $\tau$  будет число, определяемое условием:  $[dP_x(t)/dX] = 0$ . Последнее, как показано выше, приводит к уравнению (5). Подставив это выражение в (6) и заменив  $X!$  на его разложение по Стирлингу:  $X! = X^X e^{-X} (2\pi X)^{1/2}$ , получим

$$P_x(\tau) = \frac{e^{\frac{1}{2}} + X \left( 1 - e^{\frac{1}{2X}} \right)}{\sqrt{2\pi X}} \quad (7)$$

Подставив это выражение в (4) и сделав несложные преобразования, получим значение  $X$ , обеспечивающее максимум вероятности  $P_x(t)$  и  $P_k(t)$ .

Полученную модель распыливания жидкости с микрогетерогенными включениями методом вычислительного эксперимента проверяли при расходах жидкости 0,5; 1,0 и 1,5 л/мин (что соответствует типовым расходам для лабораторных АГВ через одну прорезь статора), содержащих 3% мас. частиц твердой фазы с размерами 120, 80 и 40 мкм. Одновременно модель испытывалась при распыле гомогенных растворов ПАВ (ССБ и ОП-7 в количестве 6% и 3% мас. от твердой фазы, соответственно). Результаты вычислительных испытаний модели представлены на рис. 6.

Важным показателем в данной модели является распределение частиц микрогетерофазы по каплям факела распыла: во-первых, он указывает на собственно механизм гетерогенного надрыва шейки и, во-вторых, имеет существенное технологическое значение. К примеру, если ГА-техника, работающая в режиме распыла, используется в химическом синтезе, где один из реагентов – газ, то, очевидно, что площадь контакта реагентов существенно увеличится, если капля распыла содержит в себе пузырек газообразного реагента. В связи с этим целесообразно оценить распределение частиц гетерофазы по каплям распыла и выявить факторы, влияющие на такое распределение.

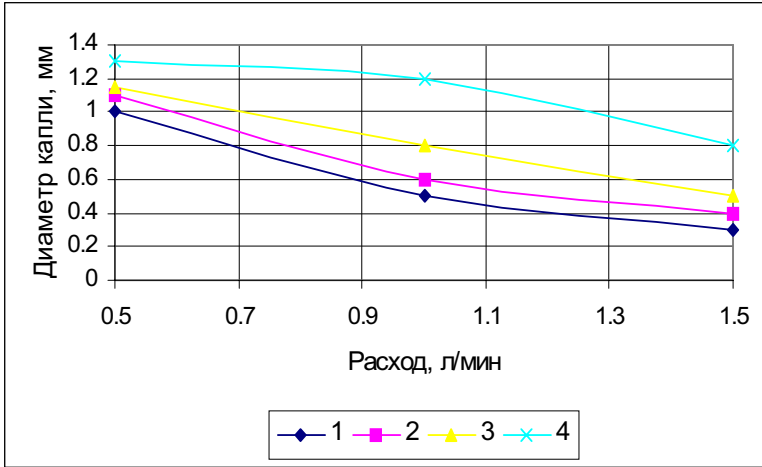


Рис. 6. Зависимость среднего диаметра капель в факеле распылы суспензии (1-3) и гомогенной жидкости (4) от расхода жидкости. 1 – суспензия со средним диаметром частиц 40 мкм; 2 – то же с размером частиц 80 мкм; 3 – то же с диаметром частиц 120 мкм; 4 – гомогенный раствор ПАВ.

Можно показать, что вероятность появления в любой наугад взятой капле факела будет обнаружено ровно  $m$  частиц, будет определяться следующей формулой:

$$P_m(t) = \frac{\rho_c \varphi}{\rho_t} \frac{\int_{r_1}^{r_2} G(r) dr \left[ \int_{R_1}^{R_2} R \rho(R) dR \right]^3}{\left[ \int_{r_1}^{r_2} r \rho(r) dr \right]^3 \int_{R_1}^{R_2} V(R) dR} \cdot \exp \left\{ - \frac{\rho_c \varphi}{\rho_t} \frac{\int_{r_1}^{r_2} G(r) dr \left[ \int_{R_1}^{R_2} R \rho(R) dR \right]^3}{\left[ \int_{r_1}^{r_2} r \rho(r) dr \right]^3 \int_{R_1}^{R_2} V(R) dR} \right\}$$

Другими словами любая наугад взятая капля факела распыла из

размерного интервала ( $R_1$ - $R_2$ ) содержит ровно  $m$  частиц из размерного интервала ( $r_1$ - $r_2$ ).

При определении вероятности того, что любая капля распыла содержит  $m$  частиц любого размера следует пользоваться формулой

$$P_m(t) = \frac{\left[ \frac{\rho_c \varphi}{\rho_t} \left( \frac{R_{sr}}{r_{sr}} \right)^3 \right]^m}{m!} \exp \left[ - \frac{\rho_c \varphi}{\rho_t} \left( \frac{R_{sr}}{r_{sr}} \right)^3 \right]$$

Эта формула позволяет найти среднее число частиц в одной капле факела распыла как момент первого порядка процесса Пуассона:

$$M_1 = \lambda t = \frac{\rho_c \varphi}{\rho_t} \left( \frac{R_{sr}}{r_{sr}} \right)^3$$

На рис. 7 показаны расчетные вероятности вхождения 1, 5 и 7 частиц в каплю распыла в зависимости от средних диаметра капель и частиц.

Расчеты показывают, что увеличение размеров частиц вдвое приводит к увеличению на порядок вероятности найти одну частицу в капле, а при уменьшении размеров частиц повышается вероятность обнаружить в капле более одной частицы.

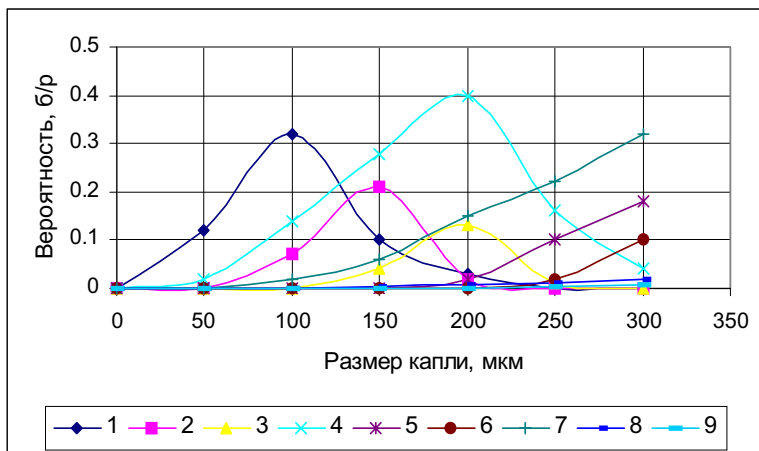


Рис. 7. Расчетные вероятности вхождения одной (1, 2, 3), пяти (4, 5, 6) и семи (7, 8, 9) частиц гетерофазы в одну каплю распыла при среднем диаметре частицы: 1, 2, 3 –  $r_{sr} = 25$  мкм, 4, 5, 6 –  $r_{sr} = 45$  мкм, 7, 8, 9 –  $r_{sr} = 95$  мкм.

4. **Четвертая глава** содержит примеры практического приложения гидроакустической технологии.

#### Пигментирование полимеров (крашение в массе – волокно «Лавсан»)

Вследствие низкой окрашиваемости методом поверхностного крашения большинство пигментированных искусственных и синтетических волокон окрашиваются методом объемного крашения. Этот метод реализуется путем введения в реакцию одного из реактантов в форме суспензии, содержащей пигмент. Именно так организовано производство пигментированных полиэфирных волокон на Могилевском комбинате синтетического волокна «Лавсан» (Белоруссия).

АГВ был изготовлен на базе насоса SU английского производства со следующими конструктивными параметрами: подача – 4,8 м<sup>3</sup>/час (по воде); напор – 18 м водяного столба; основная частота следования импульсов давления – 3,8 кГц; звуковое давление – 0,2 МПа; потребляемая мощность – 1,5 кВт; частота вращения ротора – 1450 мин<sup>-1</sup>;  $Z_p=30$ ;  $Z_c=30$ ;  $a_p=a_c=4$  мм.

За время испытаний наработано 274 партии суспензий для волокна синего (заказ МО СССР) и 99,2% волокна прошло 1-ым сортом и 0,8 – вторым. Срок службы фильерных комплектов увеличился с 24 часов до 41. Коэффициент сменяемости комплектов уменьшился с 1,4 до 0,35. Обрывистость нити уменьшилась с 2,17 до 1,40. Длительность цикла приготвления суспензии уменьшилась с 180 мин до 40; длительность гомогенизации уменьшена с 240 мин до 60. Исключены из цепочки аппаратов шаровая мельница, винтовые насосы и свистки Яна-Польмана.

#### Стабилизация хлорокиси меди (ХОМ)

Проблемами состояла в недостаточной гомогенизация ХОМ в растворе сульфитно-спиртовой барды (ССБ), что приводило к неустойчивой работе узла сушки ХОМ (сухой ХОМ – конечный продукт) вплоть до возгорания в результате окислительных процессов между ХОМ (сильный окислитель) и ССБ (горючее вещество). На основании полученных экспериментальных результатов руководству ПО «Химпром» сделано предложение по реконструкции узла репульпации 2-ой ступени. Последующая эксплуатация реконструированной установки сушки полностью исключила все негативные артефакты предыдущего технологического оформления.

Теоретические аспекты полученных результатов можно объяснить как с точки зрения повышения степени дисперсности полученных суспензий после обработки в АГВ, так и из-за повышения активности поверхности твердой фазы суспензии ХОМ в результате ГА-обработки (см. рис. 8).

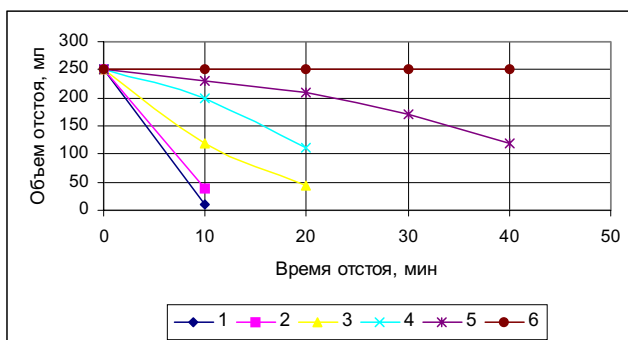


Рис. 8. Кинетика седиментации суспензии ХОМ: 1 – без ССБ механическое перемешивание (МП); 2 – без ССБ и обработка АГВ; 3 – 1% ССБ МП; 4 – 1% АГВ; 5 – 2% МП; 6 – 2% АГВ.

#### Растворение силиката натрия

Водные растворы силиката натрия общей формулой  $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$ , где  $m$  – кремнеземистый модуль (равен 1,5-3,5) или жидкое натровое стекло представляет собой крупнотоннажный продукт неорганической химии. Он имеет значение и как самостоятельный товарный продукт, так и как полупродукт применяемый более чем в 20 отраслях народного хозяйства.

Многочисленные исследования растворения силикат-глыбы показали, что это сложный многостадийный процесс, осуществляемый в пять стадий:

1) Гидратация



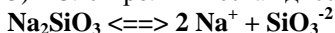
2) Переход в раствор гидратных соединений

3) Гидролиз



4) Пептизация – коллоидное растворение гидролитической щелочью кремнезема

5) Электролитическая диссоциация



Обычно, растворение силикат-глыбы заключаются в выдерживании водной суспензии силиката в герметичных автоклавах под давлением 0,6-0,8 МПа при температуре 160-180<sup>0</sup>С в течении 4-5 часов.

В наших исследованиях принята методология многофакторного планирования эксперимента с построением и анализом стохастических моделей вида (без учета четвертичных взаимодействий):

$$y^* = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{i,j} x_i x_j + \sum b_{i,j,k} x_i x_j x_k,$$

где:  $y^*$  - функция отклика;

$b_0, b_i, b_{i,j}, b_{i,j,k}$  – коэффициенты регрессии;

$x_i$  – кодированные значения исследуемых факторов.

Из литературных данных было определено 4-х мерное факторное пространство координат:

$x_1$  – массовое соотношение жидкой и твердой фаз в суспензии, мас.доля/мас.доля;

$x_2$  – температура растворения, °С;

$x_3$  – щелочность среды перед началом растворения (предварительное подщелачивание), рН;

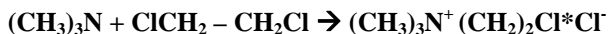
$x_4$  – реагент для предварительного подщелачивания (качественный фактор).

Совокупность результатов лабораторных исследований позволил сформулировать основные требования к конструкции промышленного АГВ: диспергатор-кавитатор с преимущественным воздействием на частицы размером 40-60 мкм и высокими напорно-расходными характеристиками. Такой аппарат был изготовлен и испытан в опытно-промышленных условиях .

Исследование кинетических кривых растворения дало возможность получить оценки абсолютного ускорения процесса растворения ГА-воздействием. Оценки утверждают, что ГА воздействие более чем в 2,5 раза (оценка – 2,58) ускоряет процесс.

#### Синтез хлорхолинхлорида

«Хлорхолинхлорид» или триметил – (2-хлорэтил) – аммоний хлорид применяется в качестве ретарданта против полегания зерновых в условиях повышенной влажности. Получают взаимодействием водного раствора триметиламина (ТМА) с дихлорэтаном (ДХЭ) при температуре 110-120<sup>0</sup>С по схеме



В промышленных условиях синтез ведут в герметичных автоклавах при указанной температуре реакции, в которых давление повышается до 0,4-0,6 МПа за счет давления насыщенных паров ТМА и воды.

По фазовому составу реакционная масс – эмульсия воды и ДХЭ (ТМА растворим в обеих фазах).

В таблице 3 представлены кинетические данные осуществления синтеза при механическом перемешивании (МП) и в условиях ГА воздействия (АГВ).

По этим данным построены зависимости логарифма эффективной константы скорости реакции от обратной температуры в координатах Аррениуса , из которых графически определили кинетические параметры скорости реакции.

Таблица 3.

Расчет эффективной константы скорости реакции, л/моль с

| Время, мин | Механическое перемешивание<br>$t = 83^{\circ}\text{C}$ | ГА-воздействие<br>$t = 83^{\circ}\text{C}$ |
|------------|--|--|
| 10         | -  | -  |
| 15         | -  | 0,0085                                     |
| 20         | -  | -  |
| 30         | 0,0073   | 0,0170                                     |
| 40         | -  | 0,0260                                     |
| 55         | 0,0098   | 0,0265                                     |
| 60         | -  | -  |
| 70         | 0,0136   | 0,0592                                     |
| 180        | 0,0231   | -  |
| $k_2$      | 0,017  | 0,0274                                     |

Кажущаяся энергия активации составила 1,97 кДж/(моль К) и 4,40 кДж/(моль К) для МП и АГВ, соответственно. Полученные оценки энергии активации указывают, во-первых, на диффузионную область протекания процесса и, во-вторых, на увеличение эффективности ГА-воздействия от 1,6 до 4 –х раз по сравнению с механическим перемешиванием.

#### Сульфатирование жира рыб

В момент обследования этого производства было обнаружено: на 1 т готовой продукции сбрасывалось 1, 172 т сточных вод, состоящих из концентрированного раствора сульфата натрия, образующихся при утилизации 99 кг 100%-ной серной кислоты 80 кг 100%-ного NaOH. Экономическая оценка в ценах 1990 года показала, что в стоки сливалось 141 тыс руб в год; коэффициент оборачиваемости реакционного объема сульфураторов и нейтрализаторов составлял, соответственно, 0,45 и 0,32, что означает нахождение реакционной массы в этих аппаратах 2,2 и 3,1 суток. На годовую программу конечного продукта в 7 тыс тонн отделение содержало 20 сульфураторов по 3,7 м<sup>3</sup> каждый и 8 нейтрализаторов по 15 м<sup>3</sup>. Установлено 38 единиц силового оборудования с суммарной мощностью 169 кВт.

Анализ лабораторных результатов привел к следующим выводам, которые были положены в основу промышленной установки производства СРЖН в ГА-поле:

- в конструкции АГВ отсутствовали застойные зоны как области концентрирования кислоты и смолообразования;

- аппарат работал при содержании воздуха в системе до 3% об.;
- сульфатирование эффективно только при концентрации кислоты не ниже 85%, поэтому использовался не менее чем двукратный избыток моногидрата;
- повышение температуры не приводит к заметному ускорению процесса ни к смещению равновесия, поэтому аппарат обладал высокой диспергирующей активностью (диффузионная область);

На основе ГА-воздействия разработано принципиально новое аппаратно - технологическое решение производства СРЖН. По этой схеме была смонтирована промышленная установка на Щелковском опытном заводе «Химзащита» и испытана на производительности 6 т/сут. В течении 300 суток было получено 1800 т СРЖН. По сравнению с базовым вариантом была исключена стадия промывки (источник сточных вод. По предложенному варианту выводился кристаллогидрат сульфата натрия).

Все партии СРЖН прошли испытания по нормам кожевенной промышленности и были признаны годными.

#### Декарбонизация раствора хлорида натрия

Одним из крупнотоннажных способов получения хлор-газа и натриевой щелочи является электролиз раствора поваренной соли. Присутствующая в рассоле сода в анодном пространстве ванны электролиза частично разлагается на  $\text{CO}_2$  и загрязняет хлор-газ, но большая часть не успевая разложиться переходит в электрощелок, где ее содержание составляет 0,4 – 0,6 г/л. При выпаривании электрощелочков содержащаяся в них сода концентрируется и ее содержание в товарном продукте – каустической соде – превышает норму для каустика высшего сорта (менее 0,44 г/л), поэтому, как правило, товарный продукт проходит только по первому (норма содержание – 0,8 г/л), а в ряде случаев и по более низкому сорту. Только в 1987 году из-за этого предприятие понесло убыток в 6 млн. рублей.

Проведены циклы экспериментов по выявлению наиболее предпочтительного приема удаления карбоната из электролизного раствора. Оказалось, что режим распыла является наиболее предпочтительным режимом обработки рассола в АГВ. Результаты этих экспериментов приведены в табл. 4.

В контрольном опыте (отстой рассола без обработки) содержание  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  за время наблюдения (6 часов) не изменилось и находилось на уровне исходных проб.

Разработанный нами способ декарбонизации позволяет осуществить процесс с достижением степени декарбонизации более чем в 2 раза большем, чем это требуется для получения каустика высшего сорта.

Данный способ предложен в промышленную практику Первомайскому промышленному объединению «Химпром».

Таблица 4.

Декарбонизация рассола АГВ в режиме распыла

| Время обработки, мин. | Содержание карбонатов, г/л |      |
|-----------------------|----------------------------|------|
|                       | 25°C                       | 60°C |
| 1                     | 0,3                        | 0,17 |
| 2                     | -                          | 0,2  |
| 3                     | -                          | 0,2  |
| 4                     | -                          | 0,2  |
| 5                     | 0,29                       | -    |
| 7                     | 0,27                       | -    |
| 10                    | 0,27                       | -    |

Производство замещенных триазинов

Одна из стадий производства симметричных замещенных триазинов является стадия, протекающая гетерогенного химического синтеза в системе «твердое тело – жидкость». Сравнительные эксперименты проведения этой стадии в реакторе Вишневого и с применением АГВ показали увеличение селективности процесса с 23,5% до 96,0%, скорости - в 3-4 раза, увеличение выхода – с 87% до 97%. Одновременно размер частиц целевых продуктов таков, что позволяет выделять их на барабанном вакуум-филт্রে. В этой стадии продукт не теряется при промывке и легко перерабатывается в препаративную форму.

Приготовление рабочих жидкостей препаративных форм гербицидов

С целью более полного использования биологического потенциала действующих веществ гербицидов, уменьшения их доз внесения на объекты обработки необходимо увеличивать качество рабочих растворов, получаемых из исходных препаративных форм. Показателем качества в этом случае выступает плотность отложения капель рабочих растворов на обрабатываемой поверхности. Использование АГВ, смонтированного непосредственно на типовых агрохимических агрегатах приготовления рабочих жидкостей позволило увеличить плотность отложения капель более чем в 10 раз с 22-30 шт/см<sup>2</sup> (без АГВ) до 280-300 шт/см<sup>2</sup> с применением ГА техники.

Производство красок

Исследования проведенные в производствах красок ( нитро- и эпоксидные эмали, водоземulsionные краски) показали существенное

увеличение качества товарных продуктов с точки зрения степени перетира при использовании ГА технологии. Так например, при производстве нитроэмали применение АГВ в качестве диспергирующего аппарата увеличивает степень перетира в 6 раз (30 мкм в традиционной технологии и 5 мкм в ГА технологии). Тот же прием в производстве вододисперсионных красок повышает степень перетира от 80 мкм до 15 мкм.

#### Процесс получения растворов йода

Применение АГВ в процессе производства йода спиртового 5% на государственном унитарном предприятии «Иммунопрепарат» (Башкирия) позволило:

- увеличить производительность в 3,2 раза;
- снизить температуру процесса с 50°С до 18°С;
- сократить производственные площади, занятые подреактора растворения с 200 м<sup>2</sup> до 20 м<sup>2</sup>;
- уменьшить количество производственного персонала на 27%;
- ликвидировать стадию «грубой» фильтрации.

#### Применение АГВ в масло-жировой промышленности

Использование элементов гидроакустической технологии в ОАО «Чишминское» (Башкирия) в производстве подсолнечного масла на стадии гидратации позволило:

- повысить производительность линии производства гидратированного масла на 57%;
- ускорить процесс коагуляции гидратированных фосфолипидов в 4 раза;
- ликвидировать стадию сушки влажного гидратированного масла;
- уменьшить потери продукта в 6,2 раза;
- ликвидировать стадию сушки фосфатидного концентрата.

Кроме того, технология гидроакустического воздействия была испытана в опытно-промышленных и промышленных масштабах в полиграфической, парфюмерно-косметической, микробиологической, машиностроительной и др. отраслях промышленности.

5. В пятой главе рассматриваются вопросы создания системотехнической классификации объектов ГА- техники и технологии.

В основу классификационной модели положена гипотеза о необходимых и достаточных условиях наиболее результативной восприимчивости технологическими процессами ГА воздействия. Под необходимыми условиями понимается наличие в обрабатываемой среде морфологических элементов «притягивающих» эффекты ГА воздействия (границы раздела фаз, микрогетерогенность и т.п.), а под достаточными - согласование пространственно - временных метрик точек приложения ГА

воздействия и конкретного объекта воздействия (последние для краткости были названы соответственно «сайтом ГА воздействия» и «сайтом процесса»). Указанные условия содержательно формируют «ГА сайт». Массив сайтов воздействия сформулирован на основе эффекта (совокупности эффектов), ответственного за протекание того или иного технологического процесса. Последнее получено на основе анализа многочисленных работ по интенсификации химико-технологических процессов акустическим воздействием и на собственном опыте автора. Массив сайтов процессов получен из анализа типовых процессов общей химической технологии исходя из положений феноменологической теории неравновесной термодинамики.

Используя характеристические параметры типологизации ГА техники осуществлена увязка ГА сайта с конструкцией аппарата. Это дает возможность исходя из требований процесса последовательно перейти через ГА сайт к конструкции АГВ целевого технологического назначения.

Согласно общей теории классифицирования под мерономией понимается вычленение частей, составляющих структуру объекта. Такая декомпозиция производится не произвольно, а на основании объективных признаков (архетипов, признаков классификации и т.п.) - меронов. Совокупность меронов определяет содержание классифицируемого объекта, а их взаимосвязь - мерономическую структуру объекта классифицирования.

Последовательность построения мерономии ГА- технологии состоит из нескольких шагов:

- выделение таксономических единиц технологических процессов;
- определение "сайтов" таксономических единиц с целью определения пространственной и временной метрик конкретных процессов, в которых формируется результат ГА-воздействия на материально-полевой объект;
- формулировка "ГА-сайтов" как согласование таких метрик "сайтов" процесса и ГА-воздействия и обеспечение в морфологии обрабатываемого объекта таких особенностей, без которых существование ГА-сайта невозможно (например, граница раздела фаз, микрогетерогенные включения и т.п.).

В наиболее общем виде совокупность типовых технологических процессов описываются феноменологической теорией явлений переноса. Перенос может осуществляться как в форме направленного течения субстанции (кондуктивный перенос), из-за макроскопической неоднородности субстанции (конвективный перенос) или вследствие хаотического движения частиц субстанции на микроскопическом уровне (молекулярный перенос).

В общем виде пространственно – временная метрика процесса может быть представлена в виде

$$t_i^\varphi = \frac{(L_i^\varphi)^n}{K} \quad (8),$$

где  $K$  – параметр, определяющий характер переноса субстанции;

$n$  – показатель степени, принимающий целочисленное значение;  $n=1, 2, 3...$

К примеру, в условиях молекулярного переноса:

- перенос импульса:  $t_i^\varphi = (L_i^\varphi / v)$ ;
- перенос вещества:  $t_i^\varphi = ((L_i^\varphi)^2 / D_m)$ ;
- перенос тепла:  $t_i^\varphi = ((L_i^\varphi)^2 / \chi)$ ,

где:  $v$ ,  $D_m$ ,  $\chi$  – кинетический коэффициент вязкости, коэффициент молекулярной диффузии, коэффициент температуропроводности.

Осуществление процессов переноса сопровождается сопротивлением, сосредоточенным в областях, примыкающих к поверхностям, через которые такой перенос осуществляется. Эти области принято называть пограничными. Толщина пограничных слоев ( $\delta$ ) по масштабу сравнима с масштабами флуктуаций характеристик переносимой субстанции ( $\delta \ll L$ ). В рамках феноменологической теории термодинамики перенос рассматривают как процесс рассасывания флуктуаций. Плотность сил сопротивления переносу в пограничных слоях тем выше, чем толще пограничный слой и чем медленнее развитие процесса в нем. В связи с этим необходимо понижать масштаб ГА воздействия по мере перехода от процессов макромасштабных к процессом с меньшими масштабами. Этим самым обоснован фундаментальный подход к синхронизации метрик «элементарных» процессов переноса и внешних воздействий на них.

Смысл синхронизации состоит в выявлении некоторой совокупности конструктивных особенностей АГВ, которые обеспечивают преимущественное возбуждение заданного комплекса воздействий. На качественном уровне такие действия раскрываются в через совмещение характеристических параметров типологизации ГА-техники с некоторыми акустическими эффектами и явлениями (см. таблицу 5). Предлагается следующий алгоритм пользования этой таблицей: из условий синхронизации метрик технологического процесса и ГА-воздействия выбирается ведущий первичный эффект или явление акустического поля и просматривается соответствующий ему столбец таблицы; в этом столбце выбираются строки, помеченные знаком (+/+); каждая строка анализируется на предмет содержания в ней указаний некоторых эффектов

и явлений, генерация которых в заданном технологическом процессе нежелательны и из первичного множества строк исключаются те, в которых нежелательные эффекты и явления помечены знаком (+); оставшиеся после такой селекции строки задают перечень характеристических параметров типологизации ГА-техники, которые должны быть учтены соответствующими значениями в конструкции аппарата целевого технологического назначения.

Однако эти операции только тогда могут быть успешными, когда раскрыта взаимосвязь между факторами ГА воздействия и конкретными технологическими процессами (см. таблицу 6).

Теперь решение задачи построения классификационной модели технологии и техники ГА воздействия очевидно: необходимо обобщить сведения таблиц 5 и 6, что в итоге дает возможность перейти от конкретного технологического процесса через ГА-сайт к конструкции АГВ целевого технологического назначения через реализацию соответствующих характеристических параметров в практической конструкции.

То, что в таблицах 5 и 6 пересечения столбцов и строк заполнены соответствующими знаками, а не конкретными численными значениями указывает лишь на то, что они служат целям построения классификационных моделей. Это однако не означает не возможность трансформации этих знаков в численные значения, особенно это касается таблицы 5, поскольку совокупность результатов изложенных в главе 2 позволяет с той или иной степенью достоверности заменить ячейки этой таблицы на число или числовой интервал. Что касается таблицы 6, то переход от качественных рассуждений к количественным оценкам не столь очевиден и связан с необходимостью проведения экспериментальных исследований в приложении к конкретным условиям осуществления процессов, руководствуясь выводами главы 3 нашей работы.

Таблица 5

## Соотнесение сайтов ГА-процессов с конструкцией ГА-техники

| Критерий<br>типа    | Практ.<br>реал.  | Сайты ГА-воздействия                              |                        |                 |                    |        |   |
|---------------------|------------------|---|------------------------|-----------------|--------------------|--------|---|
|                     |                  | Акуст.<br>течения                                 | Пульсации<br>пузырьков | Пондер.<br>силы | Кавит.<br>давление | Радиц. |   |
| 1                   | 2                | 3   | 4                      | 5               | 6                  | 7      |   |
| $k_p$               | $k_p < 2$        | Только гидродинамическое воздействие без акустики |                        |                 |                    |        |   |
|                     | $k_p = 2$        | +/-   | -                      | -               | -                  | +/-    |   |
|                     | $k_p > 2$        | +   | +                      | +               | +                  | +      |   |
| $I_1$               | Оптимальное      | +   | +                      | +               | +/+                | +      |   |
| $Z_p/Z_c$           | $f \leq 1$       | +   | +/+                    | +               | -                  | +      |   |
|                     | $f > 1$          | +   | +                      | +               | +                  | +      |   |
| Схемы<br>совмещений | СНИ              | +   | -                      | +               | +/+                | +      |   |
|                     | СОИ              | +   | +                      | +               | +                  | +      |   |
|                     | ССИ              | +/+   | +/+                    | +               | -                  | +      |   |
| $k_{оп}$            | $k_{оп} = 1$     | +   | -                      | +               | +                  | +      |   |
|                     | $k_{оп} > 1$     | +/+   | +/+                    | +               | -                  | +      |   |
| $\Psi$              | Прозрачность     | Гидродинамическое воздействие без акустики        |                        |                 |                    |        |   |
|                     | Ритмика          |   | +                      | -               | -                  | -      | + |
|                     | Перекрытие       | +   | +/+                    | +/+             | +/+                | +      |   |
| $\delta$            | Оптимум          | +   | +/+                    | +/+             | +/+                | +      |   |
| $k_{рез}$           | $k_{рез} = 4$    | +   | +/+                    | +/+             | +/+                | +      |   |
|                     | $k_{рез} \neq 4$ | +   | +                      | +               | +/+                | +      |   |
| $k_H$               | $k_H = 3$        | +   | +/+                    | +/+             | +/+                | +      |   |
|                     | $k_H \neq 3$     | +   | +/+                    | +/+             | +/+                | +      |   |
| $k_m$               | Оптимум          | +   | +/+                    | +/+             | +                  | +      |   |
| $k_{цбн}$           | Лопатки          | Насосные характеристики ГА-техники                |                        |                 |                    |        |   |
|                     | Радиальные       |   |                        |                 |                    |        |   |
|                     | Тангенциальные   |   |                        |                 |                    |        |   |

В этой таблице приняты следующие обозначения:

- - явление не генерируется;
- +/- - слабая генерация явления;
- +
- +
- +/+ - преимущественно генерируемое явление.

Таблица 6

Соотнесение факторов ГА-воздействия с технологическими процессами

| Процесс         | Факторы ГА-воздействия (*) |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |
|-----------------|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
|                 | 1                          | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Отстаивание     | +                          | + | + | + | + |   |   |   |   |    |    |
| Флотация        |                            | + | + | + | + | + |   |   |   |    |    |
| Промывка газов  |                            |   | + | + | + | + |   |   |   |    | +  |
| Дегазация       | +                          | + | + | + |   |   |   |   |   |    |    |
| Перемешивание   | +                          | + | + | + |   |   |   |   |   |    |    |
| Эмульгирование  | +                          | + | + | + |   |   |   |   |   |    |    |
| Аэрирование     | +                          | + | + | + |   |   |   |   |   |    |    |
| Теплообмен      | +                          | + | + | + |   |   |   |   |   |    |    |
| Парообразование | +                          | + | + | + | + | + | + |   |   | +  |    |
| Кристаллизация  | +                          | + | + | + | + |   |   |   |   |    | +  |
| Растворение     | +                          | + | + | + | + |   |   |   |   | +  |    |
| Набухание       | +                          | + | + | + | + | + | + | + | + |    | +  |
| Абсорбция       | +                          | + | + | + | + |   |   |   |   | +  |    |
| Адсорбция       | +                          | + | + | + | + |   |   |   |   |    |    |
| Десорбция       | +                          | + | + | + | + | + | + | + |   | +  |    |
| Экстракция (Т)  | +                          | + | + | + | + | + | + |   |   |    | +  |
| Экстракция (Ж)  | +                          | + | + | + | + | + | + | + |   |    |    |

Примечание (\*): а – знаком (+) отмечено влияние фактора на процесс;  
б – легенда к столбцам 2 – 11 таблицы:

2– течение в пограничном слое; 3 - микротоки; 4 - акустическая турбулентность; 5 – сила Бьеркнесса; 6 – сила Бернулли; 7 – радиационное давление; 8 – ударные волны; 9 – кумулятивные струи; 10 – выпрямленная диффузия; 11 – звукокапиллярный эффект.

### **Общие выводы**

1. Достигнута основная цель поставленная в настоящей работе, т.е. осуществлено комплексное обобщение техники гидроакустического воздействия и технологии ее применения, разработаны научно обоснованные технические и технологические решения, использование которых существенно расширяет потенциальную сферу применения ГА-техники в конкретных технологических условиях типовых процессов промышленных технологий.
2. Сформулированы и решены задачи системотехнического анализа процессов и аппаратов в условиях гидроакустического воздействия.
3. Осуществлен функционально-структурный анализа конструкций гидроакустической техники.
4. Выявлены точки приложения и предложены механизмы ГА воздействия.
5. Осуществлена оценка режимов работы аппаратов системы «ротор-статор», в том числе частотно-амплитудных характеристик аппаратов гидроакустического воздействия; стробирования импульсов давления в одно- и много роторных аппаратах.
6. Выявлены принципы повышения эффективности преобразования энергии в аппаратах гидроакустического воздействия путем оптимизации размера зазора между ротором и статором модулятора и выбором геометрических размеров камеры озвучивания.
7. Показаны приемы управления частотно-амплитудным спектром колебаний звукового давления в полостях аппарата через целенаправленный выбор соотношения размеров элементов перфорации в роторе и статоре и их числа.
8. Обоснованы теоретически и предложены практические приемы профилирования лопастных зон роторов аппаратов гидроакустического воздействия.
9. Создана научно-теоретическая основа получения дисперсных систем в аппаратах гидроакустического воздействия.
10. На основании предложенного объяснения механизма обнаруженного явления кооперативного поведения дисперсных частиц в гетерофазных продуктах разработан прием оптимизации количества энергии, передаваемой обрабатываемой среде, в гидроакустической технике.
11. Осуществлена оценка особенностей течения газожидкостных потоков в полостях рабочего колеса аппарата гидроакустического воздействия. Установлены условия устойчивой работы АГВ в газонасыщенных средах.
12. Предложен механизм получения газожидкостных систем в аппаратах гидроакустического воздействия.

13. Выявлены пространственно-временные метрики «элементарных» технологических процессов и эффектов гидроакустического воздействия.
14. Создана системная классификация гидроакустической техники и технологии.

**Основное содержание опубликовано в работах:**

1. А. С. №1264568 (СССР). Способ отгонки растворителя из продуктов сольвентного фракционирования нефтяных остатков. А.К. Курочкин, Р.Н. Гимаев, Р.Б. Валитов, ..., Ю.В. Бадиков.- Оpubл. в Б.И. 1987, №3.
2. А.С. №1372991 (СССР). Устройство для подготовки прядильных растворов перед формованием. Р.Н. Гимаев, А.Б. Марушкин, А.К. Курочкин, ..., Ю.В. Бадиков. – Оpubл. в Б.И. 1989, №6.
3. А.С. №1462907 (СССР). Насос-диспергатор. А.К. Курочкин, Г.А. Коврижников, Ю.В. Бадиков. – Оpubл. в БИ 1987, №7.
4. А.С. № 1465100 (СССР). Роторный аппарат гидроакустического воздействия. А.К. Курочкин, А.Н. Докучаев, Ю.В. Бадиков. – Оpubл. в Б.И. 1989, № 10.
5. А.С. № 1477458 (СССР). Роторно-пульсационный аппарат. А.К. Курочкин, Ю.В. Бадиков, Р.Б. Валитов. – Оpubл. в Б.И. 1989, № 17.
6. А.С. № 1479088 (СССР). Роторный аппарат. А.К. Курочкин, Ю.В. Бадиков, Г.А. Сергеев. – Оpubл. в Б.И. 1989, № 18.
7. А.С. № 297678 (СССР). Не публикуется. Гарифзянов Г.Г., Яруллин Р.Н., ..., Бадиков Ю.В.
8. А.С. № 1554955 (СССР). Погружной роторный аппарат гидроакустического воздействия. А.К. Курочкин, А.Н. Докучаев, Ю.В. Бадиков. – Оpubл. в Б.И. 1990, № 13.
9. А.С. №314677 (СССР). Не публикуется. Гарифзянов Г.Г., Яруллин Р.Н., ..., Бадиков Ю.В.
10. А.С. № 1565501 (СССР). Насос-диспергатор. А.К. Курочкин, Г.А. Коврижников, Ю.В. Бадиков. – Оpubл. в Б.И. 1990, № 19.
11. А.с. № 1583369 (СССР). Аэратор. А.К. Курочкин, Р.Б. Валитов, Ю.В. Бадиков. – Оpubл. в Б.И. 1990, № 29.
12. А.с. № 1588432 (СССР). Погружной диспергатор. А.К. Курочкин, Р.Б. Валитов, Ю.В. Бадиков. – Оpubл. в Б.И. 1990, № 32.
13. Патент №1720111 от 03.03.93. Способ растворения силиката натрия. Бадиков Ю.В., Исмагилов Ф.Р., Захваткин А.А.
14. Патент №18361133. Сатуратор. Бадиков Ю.В., Курочкин А.К., Марушкин А.Б. – Оpubл. в БИ №31, 23.08.93.
15. Бадиков Б.В. Интенсификация промышленного производства трихлорбензола акустическим воздействием. Автореф. дисс..... к.т.н. – Уфа: ВНИТИГ, 1985. – 25 с.

16. Бадиков Ю.В. Техника и технология гидроакустического воздействия в процессах химической технологии. – Уфа: Реактив, 2001. – 204 с.

17. Бадиков Ю.В., Галиахметов Р.Н., Курочкин А.К. Совершенствование технологии получения дифенилолпропана. В сб. «Совершенствование процессов нефтехимического синтеза». – Уфа, 1986.

18. Бадиков Ю.В. Гидроакустическое воздействие в технологии диспергирования. – Там же, стр 122.

19. Бадиков Ю.В., Галиахметов Р.Н., Манойлов А.М. Об эффективности различных методов воздействия в химической технологии. В сб. «Акустическая кавитация и применение ультразвука в промышленности». – Славское, 1985. – стр. 69.

20. Бадиков Ю.В., Нечаев А.Ю., Гарифуллина З.Н. Эмульгирование щелочных металлов гидроакустическим воздействием. В сб. «Достижения в области физико-химических методов анализа и аналитического контроля производства». – Уфа: НИИнефтехим, 1985. – стр. 98-99.

21. Бадиков Ю.В. Гидроакустическое воздействие в производстве хлорбензола. – Там же, стр. 80.

22. Бадиков Ю.В., Гарифуллина З.Н. Исследование гидроакустического воздействия на диспергирование твердой фазы препарата «Далур». В сб. «Новое в области разработки ХСЗР». – Уфа: ВНИТИГ, 1985. – стр. 40.

23. Валитов Р.Б., Курочкин А.К., Бадиков Ю.В. Рациональная технология приготовления рабочих жидкостей. – Защита растений, № 3, 1985. – стр. 30-31.

24. Валитов Р.Б., Курочкин А.К., Маргулис М.А., Бадиков Ю.В. Химические и физико-химические процессы в полях, создаваемых гидроакустическими излучателями. 1. Интенсифицирующее действие гидроакустического поля на некоторые химические реакции. – Журнал физической химии, № 4, 1986. – стр. 889-892.

25. Галиахметов Р.Н., Бадиков Ю.В., Гарифуллина З.М. Интенсификация реакций дегидрохлорирования и синтеза тиолкарбаматов в гидроакустическом поле. В сб. «Акустическая кавитация и применение ультразвука в промышленности». – Славское, 1985. – стр. 86.

26. Галиахметов Р.Н., Бадиков Ю.В., Манойлов А.М. Кинетика реакций натриевых солей некоторых тиолкарбаминовых кислот с хлористым этилом в акустическом поле. В сб. «Д.И. Менделеев и современная химия». – Уфа, 1984. – стр. 54.

27. Кандауров А.А., Степанова М.Ф., Бадиков Ю.В. Повышение эффективности гидродинамического излучателя роторного типа. – Указатель ВИНТИ «Депонированные рукописи», №10, 1981.

28. Курочкин А.К., Бадиков Ю.В., Макин В.А. Гидродинамический кавитатор – новый аппарат для процессов химической технологии. В сб. «Совершенствование технологии получения гербицидов». – Уфа: ВНИТИГ, 1984. – стр. 28-29.

29. Курочкин А.К., Бадиков Ю.В., Смородов Е.А. Ультразвук – новый технологический фактор в производстве ХСЗР. Там же. – стр. 30-31.

30. Курочкин А.К., Бадиков Ю.В., Манойлов А.М. Дезагрегирование некоторых пигментов под воздействием гидроакустического поля. – ЛКМ, №4, 1985. – стр. 57-59.

31. Курочкин А.К., Бадиков Ю.В., Манойлов А.М. Применение ультразвука в технологии получения высококонцентрированных нефтемасляных эмульсий. – Химическая технология, №3, 1985. – стр. 45-49.

32. Курочкин А.К., Бадиков Ю.В. Пути повышения эффективности гидроакустических аппаратов роторного типа. 1. Режимы работы аппаратов роторного типа. Пути уменьшения потерь энергии. В сб. «Новое в области разработки гербицидов». – Уфа: ВНИТИГ, 1987. – стр. 100 –111.

33. Курочкин А.К., Бадиков Ю.В. Пути повышения эффективности гидроакустических аппаратов роторного типа. 2. Увеличение напряженности генерируемых полей рациональным выбором геометрических размеров прорезей в роторе и статоре. Механизм стробирования импульсов давления. Там же. – стр. 111 –123.

34. Курочкин А.К., Смородов Е.А., Маргулис М.А., Бадиков Ю.В. Химические и физико-химические процессы в полях создаваемых гидроакустическими излучателями. 2. О возникновении сонолюминесценции. – ЖФХ, т. 10, №4, 1986. – стр. 893-897.

35. Бадиков Ю.В., Валитов Р.Б., Пилюгин В.С. Моделирование процессов получения высоко дисперсных систем в условиях кавитации и стесненного удара, а также оптимизации количества энергии, подводимой для диспергирования. - Труды Всероссийского совещания «Турбулизация потоков в трубчатых аппаратах как основа создания высокоэффективных энерго- и ресурсосберегающих промышленных технологий повышенной экологической безопасности».

36. Пилюгин В.С., Валитов Р.Б., Бадиков Ю.В. Использование турбулентных аппаратов смешения со встроенными аппаратами гидроакустического воздействия для повышения технологических характеристик реакций твердое-жидкость и между двумя несмешивающимися жидкими фазами. - Там же

37. Бадиков Ю.В., Валитов Р.Б., Пилюгин В.С. Использование аппаратов гидроакустического воздействия для интенсификации технологических процессов. 1. Вероятностно-статистическое

моделирование получения дисперсных систем в аппаратах гидроакустического воздействия. - Башкирский химический журнал, Т.7, №2, 2000, с. 58-68.

38. Пилюгин В.С., Валитов Р.Б., Бадиков Ю.В., др. Использование аппаратов гидроакустического воздействия для интенсификации технологических процессов. 2. Улучшение технологических параметров гетерофазных реакций «твердое тело-жидкость» на примере синтеза замещенных 2-хлор-4,6-диалкиламино-*сис*-триазинов. - Башкирский химический журнал, Т.7, №2, 2000, с.69-75

39. Пилюгин В.С., Валитов Р.Б., Бадиков Ю.В., др. Использование аппаратов гидроакустического воздействия для интенсификации технологических процессов. 3. Улучшение технологических характеристик реакций между двумя веществами, находящимися в несмешивающихся жидких фазах, на примере синтеза 4-амино-4(бис)-нитродифенилсульфида. - Башкирский химический журнал, Т.7, №2, 2000, с.76-78.

40. Пилюгин В.С., Валитов Р.Б., Бадиков Ю.В., др. Использование аппаратов гидроакустического воздействия для интенсификации технологических процессов. 4. Оптимизация синтеза 4-амино- 2(бис)-нитродифенилсульфида. - Башкирский химический журнал, Т.7, №2, 2000, с. 79-82.

41. Бадиков Ю.В., Щепланов С. А. Механизм инициирования звукохимических реакций факторами электрокинетической природы. 1. Деформационно-электрическая гипотеза. - Башкирский химический журнал, Т.8, №2, 2001, с. 63-72.

42. Бадиков Ю.В., Щепланов С. А. Механизм инициирования звукохимических реакций факторами электрокинетической природы. 2. Оценка деформационно-электрической гипотезы на примере производства битумных материалов. - Башкирский химический журнал, Т.8, №2, 2001, с. 73-79.