

**М.А. ПРОМТОВ**

**МАШИНЫ И АППАРАТЫ  
С ИМПУЛЬСНЫМИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ  
ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА  
ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ  
ВЕЩЕСТВА**

**МОСКВА**

**«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»  
2004**

**М.А. ПРОМТОВ**

**МАШИНЫ И АППАРАТЫ  
С ИМПУЛЬСНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ  
ВЕЩЕСТВА**

**М.А. ПРОМТОВ**

**МАШИНЫ И АППАРАТЫ  
С ИМПУЛЬСНЫМИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ  
ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА  
ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ ВЕЩЕСТВА**

Учебное пособие

---

МОСКВА  
«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»  
2004

УДК 684.4.05(075)  
ББК Л11-5я73  
П81

**Рецензенты:**

Доктор технических наук, профессор

*Д.А. Баранов*

Доктор технических наук, профессор

*С.И. Дворецкий*

**Промтов М.А.**

П81 Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества: Учебное пособие. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. – 136 с.

Учебное пособие рассматривает вопросы, связанные с интенсификацией химико-технологических процессов импульсными энергетическими воздействиями. Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований физико-химических процессов в обрабатываемых средах при интенсивных импульсных воздействиях, описания конструкций машин и аппаратов с импульсным энергетическим воздействием различного характера на обрабатываемые среды.

Учебное пособие предназначено студентам, магистрам, аспирантам и специалистам в области машин и аппаратов химических и смежных производств и технологий.

УДК 684.4.05(075)  
ББК Л11-5я73

ISBN 5-94275-121-8

© Промтов М.А., 2004

© «Издательство Машиностроение-1», 2004

Учебное издание

**ПРОМТОВ Максим Александрович**

**МАШИНЫ И АППАРАТЫ  
С ИМПУЛЬСНЫМИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ  
ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА  
ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ ВЕЩЕСТВА**

Учебное пособие

Редактор Т.М. Глинка  
Компьютерное макетирование Е.В. Кораблевой

Подписано в печать 5.04.04

Формат 60 × 84 / 16. Бумага офсетная. Печать офсетная  
Гарнитура Times New Roman. Объем: 7,9 усл. печ. л.; 7,8 уч.-изд. л.  
Тираж 400 экз. С. 273<sup>М</sup>

«Издательство Машиностроение-1»,  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в издательско-полиграфическом центре  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация химико-технологических процессов (ХТП) является одной из важных задач науки и техники. Основой увеличения производительности оборудования и снижения энергозатрат на проведение ХТП может служить создание и внедрение эффективных технологических аппаратов с малой удельной энергоемкостью и материалоемкостью, высокой степенью воздействия на обрабатываемые вещества. Подобные разработки базируются на принципиально новых инженерных решениях, теоретических и экспериментальных исследованиях физико-химических процессов в обрабатываемых средах при интенсивных импульсных воздействиях.

Научной базой для разработки аппаратов с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества должна стать новая методология, учитывающая взаимное влияние энергетических полей, физико-химических эффектов, трансформацию и инверсию видов энергетического воздействия. Учитывая многогранность этих задач, актуальным является анализ комбинаций воздействий и их влияния на интенсивность ХТП. Проблемой, сдерживающей разработку аппаратов для интенсификации ХТП и методов их расчета, является недостаточность систематизации и комплексности в подходе к интенсификации химико-технологических процессов при импульсных энергетических воздействиях, в исследовании комплекса физических, физико-химических и химических явлений, возникающих в обрабатываемых веществах.

Анализ физико-химических эффектов, возникающих при акустическом, механическом, электрическом, магнитном, тепловом, радиационном и химическом воздействиях на вещества показал, что эти воздействия вызывают изменение агрегатного состояния (полное или частичное), изменение физико-химических свойств сплошной фазы, дробление или коагуляцию дисперсных частиц, гомогенизацию среды. Правильно выбранное и управляемое воздействие способствует интенсификации ХТП.

В этой книге даны основы методологии интенсификации ХТП при импульсных энергетических воздействиях на обрабатываемые вещества. На основе анализа методов организации ХТП показано, что пульсационная форма организации процесса оказывается более эффективной по сравнению с традиционными схемами, проведена классификация видов воздействий. Анализ физических воздействий и физико-химических эффектов, возникающих в результате этих воздействий, позволил выявить общие закономерности их проявления. Приведены описания принципа действия и конструкций машин и аппаратов с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

---

Увеличение скорости технологического процесса и производительности технологического оборудования, снижение его энерго- и материалоемкости, улучшение качества продукта – это основные цели, которые ставят перед собой проектировщики и конструкторы при разработке новых или модернизации известных конструкций машин и аппаратов. Для достижения этих целей разрабатывается и изготавливается новое высокоэффективное оборудование, применяются различные физико-химические эффекты и явления на основе научно-технического прогресса и новых технологических подходов в производстве различных продуктов.

Одними из наиболее эффективных способов и методов при решении подобных задач являются импульсные энергетические воздействия на обрабатываемые вещества. Технологическое оборудование, использующее в эти эффекты, активно применяется в различных отраслях промышленности, особенно в химической и смежных с ней технологиях.

Основное назначение данной работы – это ознакомление студентов, магистрантов, аспирантов и специалистов, работающих в области химической технологии, с возможностями использования машин и аппаратов с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества. В предлагаемой книге автор старался систематизировать и разработать методологию применения импульсных энергетических воздействий и проиллюстрировать их использование на конкретных конструкциях. Цель предлагаемого пособия – это сформировать творческий подход при проектировании и разработке технологического оборудования, использовать явные и скрытые возможности и энергетические эффекты при его работе.

АВТОР ПРИНОСИТ БЛАГОДАРНОСТЬ РЕЦЕНЗЕНТАМ ПРОФЕССОРУ БАРАНО- ВУ Д.А. И ПРОФЕССОРУ ДВОРЕЦКОМУ С.И., А ТАКЖЕ ДОЦЕНТУ КОРМИЛЬЦИ- НУ Г.С. ЗА ВНИМАТЕЛЬНОЕ ПРОЧТЕНИЕ РУКОПИСИ, СОВЕТЫ И ЗАМЕЧАНИЯ, ПРОФЕССОРУ КОНОВАЛОВУ В.И. ЗА КОНСУЛЬТИРОВАНИЕ, НЕОЦЕНИМУЮ ПОМОЩЬ И СОВМЕСТНУЮ РАБОТУ НАД НЕКОТОРЫМИ РАЗДЕЛАМИ.

## Введение

---

---

Интенсификация химико-технологических процессов (ХТП) является одной из важных задач науки и техники. Основой увеличения производительности оборудования и снижения энергозатрат на проведение ХТП может служить создание и внедрение эффективных технологических аппаратов с малой удельной энергоемкостью и материалоемкостью, высокой степенью воздействия на обрабатываемые вещества. Подобные разработки базируются на принципиально новых инженерных решениях, теоретических и экспериментальных исследованиях физико-химических процессов в обрабатываемых средах при интенсивных импульсных воздействиях.

Научной базой для разработки аппаратов с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества должна стать новая методология, учитывающая взаимное влияние энергетических полей, физико-химических эффектов, трансформацию и инверсию видов энергетического воздействия. Учитывая многогранность этих задач, актуальным является анализ комбинаций воздействий и их влияния на интенсивность ХТП. Проблемой, сдерживающей разработку аппаратов для интенсификации ХТП и методов их расчета, является недостаточность систематизации и комплексности в подходе к интенсификации химико-технологических процессов при импульсных энергетических воздействиях, в исследовании комплекса физических, физико-химических и химических явлений, возникающих в обрабатываемых веществах.

Анализ физико-химических эффектов, возникающих при акустическом, механическом, электрическом, магнитном, тепловом, радиационном и химическом воздействиях на вещества показал, что эти воздействия вызывают изменение агрегатного состояния (полное или частичное), изменение физико-химических свойств сплошной фазы, дробление или коагуляцию дисперсных частиц, гомогенизацию среды. Правильно выбранное и управляемое воздействие способствует интенсификации ХТП.

**В ПОСОБИИ ДАНЫ ОСНОВЫ МЕТОДОЛОГИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХТП ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ ВЕЩЕСТВА. НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ ХТП ПОКАЗАНО, ЧТО ПУЛЬСАЦИОННАЯ ФОРМА ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОКАЗЫВАЕТСЯ БОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПО СРАВНЕНИЮ С ТРАДИЦИОННЫМИ СХЕМАМИ, ПРОВЕДЕНА КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ВОЗДЕЙСТВИЙ. АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭТИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ПОЗВОЛИЛ ВЫЯВИТЬ ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ. ПРИВЕДЕНЫ ОПИСАНИЯ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИЙ МАШИН И АППАРАТОВ С ИМПУЛЬСНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ ВЕЩЕСТВА.**

### **1. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ**

---

---

# 1.1. МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

## 1.1.1. Основные понятия

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 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.

В настоящее время одним из перспективных методов интенсификации химико-технологических процессов и повышения эффективности технологического оборудования (ТО) признаются методы, основанные на импульсных энергетических воздействиях с применением различных физико-химических эффектов, использующих внутренние и внешние источники энергии.

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.

*Системой* называется множество находящихся в отношениях и связях между собой элементов, представляющих единое целое и предназначенное для достижения какой-либо цели [2]. Любой элемент системы рассматривается как система более низкого порядка, а сама система – как элемент системы более высокого уровня. Анализ и синтез систем основаны на понятиях иерархичности, т.е. отдельные уровни системы определяют аспекты ее функционирования. Результат взаимодействия всех уровней системы определяет ее работу. Наличие отношений и связей между элементами, образующими систему, позволяет ей выступать в качестве единого целого во взаимоотношениях с внешней средой.

Для интенсификации ХТП необходимо рассматривать механизмы, способствующие ускорению основных технологических стадий с получением продукта требуемого или повышенного качества (иногда можно, значительно выигрывая в скорости технологического процесса, несколько терять в качестве продукта).

Возможны несколько вариантов результатов интенсификации ХТП:

1) 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;

2) интенсификация способствует ускорению ХТП при неизменном качестве продукта; например, увеличение скорости омывания дисперсных частиц при растворении ускоряет процесс, но предельная концентрация раствора не позволяет изменить содержание количества вещества в объеме жидкости;

3) 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

$$i = \frac{M}{St}, \quad (1.1)$$

которое показывает количество перенесенного вещества (энергии)  $M$ , кг (Дж) через единицу площади (объема)  $S$ ,  $m^2$  ( $m^3$ ) 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  $i$  [9]. Критерий  $i$  получен на основе линейных кинетических уравнений, которые в ряде случаев не охватывают всего многообразия и сложности явлений тепло- и массопереноса [6, 7].

Линейные законы переноса типа  $\frac{dM}{dt} = kSF$ , 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 анализа нелинейных соотношений между потоком переноса и градиентом потенциала используют принципы термодинамики необратимых процессов [8, 9].

Для большинства тепломассообменных, 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 тепломассообменных 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 [1, 3 – 5, 10 – 14].

### 1.1.2 Метод формального анализа параметров, влияющих на интенсивность ХТП

Рассмотрим метод на примере интенсификации процесса теплообмена [3].

Интенсивность теплообмена можно выразить как

$$i = \frac{Q}{St} = K\Delta t = K \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{2,3 \lg \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right) 2,3 \lg \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}}, \quad (1.2)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи;  $S$  – поверхность теплообмена;  $t$  – время;  $\Delta t$  – средняя разность температур;  $\Delta t_n$ ,  $\Delta t_k$  – начальная и конечная разность температур между теплоносителями;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи;  $\delta_i$  – толщина стенки, осадка, загрязнений;  $\lambda_i$  – теплопроводность стенки, осадка, загрязнений.

Эту зависимость можно использовать для составления наглядной схемы действий по интенсификации конкретного теплообменного процесса, обозначив  $\uparrow$  – необходимость увеличения и  $\downarrow$  – необходимость уменьшения того или иного параметра.

Зависимость (1.2) можно записать в виде

$$i \uparrow = \Delta t_n \uparrow, \Delta t_k \downarrow, \alpha_1 \uparrow, \delta_i \downarrow, \lambda_i \uparrow, \alpha_2 \uparrow. \quad (1.3)$$

Такая схема наглядно показывает направление изменения тех или иных параметров процесса или конструктивных характеристик аппарата для интенсификации процесса теплообмена.

Необходимо увеличивать коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  для обоих теплоносителей, теплопроводность материала аппарата и инкрустации  $\lambda_1$ , начальную разность температур  $\Delta t_n$ ; уменьшать конечную разность температур между теплоносителями  $\Delta t_k$  и толщину стенки теплопередающей поверхности и загрязнений  $\delta_i$ .

Анализ процесса и выявление лимитирующего уровня в соответствии с изложенным выше методом позволяют отобрать из формулы (1.3) факторы, соответствующие по масштабу лимитирующему уровню. Анализ формализованных зависимостей, описывающих механизм технологического процесса, необходимо проводить с учетом технической и экономической целесообразности изменения того или иного параметра.

Для определения дальнейшего направления интенсификации рассмотрим уравнения теплопереноса и используем одно из известных выражений для  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в виде критериальной зависимости

$$\alpha = \frac{\lambda}{l} A \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,33} (\text{Pr}/\text{Pr}_{\text{CT}})^{0,25}. \quad (1.4)$$

Откуда, не учитывая  $(\text{Pr}/\text{Pr}_{\text{CT}})^{0,25}$ , получаем

$$\alpha = A \lambda^{0,67} V^{0,8} l^{-0,2} \rho^{0,8} C_p^{0,33} \mu^{-0,47}. \quad (1.5)$$

Здесь  $\lambda$  – теплопроводность теплоносителя;  $l$  – определяющий линейный размер (например, толщина слоя теплоносителя);  $\text{Re} = Vl/\mu$  – критерий Рейнольдса;  $\text{Pr} = \mu/(\rho a)$  – критерий Прандтля;  $V$  – скорость;  $a = \lambda/(C_p \rho)$  – коэффициент температуропроводности;  $\rho$  – плотность;  $C_p$  – теплоемкость.

Тогда формула (1.3) примет вид

$$i = \Delta t_{\text{н}} \uparrow \Delta t_{\text{к}} \downarrow \delta_{\text{ст}} \downarrow \lambda_{\text{ст}} \uparrow \lambda_{\text{загр}} \uparrow \delta_{\text{загр}} \downarrow \lambda_1 \uparrow V_1 \uparrow \rho_1 \uparrow C_{p2} \uparrow l_1 \downarrow \mu_1 \downarrow \lambda_2 \uparrow V_2 \uparrow \rho_2 \uparrow C_{p2} \uparrow l_2 \downarrow \mu_2 \downarrow \quad (1.6)$$

Индексы 1 и 2 относятся к характеристикам потоков двух теплоносителей.

Программа интенсификации ХТП (1.6) включает в себя как режимно-технологические, так и аппаратно-конструктивные характеристики теплообменного процесса на различных уровнях иерархии ХТС.

Рассмотрим программу интенсификации массообменного процесса [3].

Если использовать основное уравнение процесса массопереноса, то для наиболее распространенных тарельчатых массообменных аппаратов фактор интенсивности можно определить по формуле

$$i = M/v = K \Delta C / v, \quad (1.7)$$

где  $M$  – масса вещества, перенесенного в единицу времени;  $v = n(v_6 + v_c) = nS(H_6 + H_c)$  – объем тарельчатого аппарата;  $n$  – число секций в аппарате;  $v_6$ ,  $v_c$  – соответственно объем рабочей (например, барботажной) и сепарационной зон одной секции аппарата;  $S$  – площадь поверхности полотна тарелки;  $H_6$ ,  $H_c$  – соответственно высота барботажной и сепарационной зон;  $K$  – коэффициент массопередачи, отнесенный к  $1 \text{ м}^2$  полотна тарелки;  $\Delta C$  – разность концентраций (движущая сила процесса).

Для противоточного аппарата, считая коэффициент массопередачи независимым от концентрации, запишем

$$i = K \Delta C / [n(H_6 + H_c)]. \quad (1.8)$$

Из формулы (1.8) видно, что на величину фактора интенсивности оказывает влияние параметр  $K$ , характеризующий кинетику массообменного процесса, параметры  $\Delta C$  и  $n$ , тесно связанные со статическими характеристиками процесса, в частности, с равновесием между фазами, определяемые термодинамическими свойствами компонентов системы, а также параметрами  $H_6$  и  $H_c$ . Последние зависят в основном от конструктивных особенностей аппарата и физико-химических свойств перерабатываемых продуктов. Если использовать понятие эффективности ступени контакта  $\eta$ , то

$$i = \eta K \Delta C / [n_m(H_6 + H_c)], \quad (1.9)$$

где  $n_m$  – число необходимых теоретических ступеней контакта. Тогда алгоритм интенсификации массообменного процесса можно записать так:



$$i \uparrow = \eta \uparrow K \uparrow \Delta C \uparrow n_m \downarrow H_6 \downarrow H_c \downarrow. \quad (1.10)$$

Если анализ показывает, что лимитирующим является молекулярный уровень, то необходимо искать пути увеличения коэффициента массопередачи  $K$ .

Для того чтобы учесть энерго- и материалоемкость ХТС, введем в качестве параметра, характеризующего интенсивность ХТП, удельную производительность, т.е. производительность, отнесенную к количеству энергии и времени, затраченных на реализацию процесса, объем или площадь аппарата:

$$u = \frac{M}{E \tau(S)}, \left[ \frac{\text{кг}}{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3 (\text{м}^2)} \right]. \quad (1.11)$$

Метод формального анализа параметров, влияющих на интенсивность ХТП, показывает направление общего подхода при первичном рассмотрении ХТС с целью ее модернизации.

### 1.1.3 Методы интенсификации ХТП

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

Декомпозиционные методы можно разделить на две, тесно связанные между собой группы: *режимно-технологические* и *аппаратурно-конструктивные* [3]. 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 [15].

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. В этом случае можно провести аналогию между режимными и активными, конструктивными и пассивными методами. Многие режимные и конструктивные методы связаны между собой, и здесь целесообразно применять комплексный подход в решении задач интенсификации ХТП [1 – 3, 15, 16].

Структура методов интенсификации ХТП при энергетических воздействиях на обрабатываемую среду показана на рис. 1.1. Каждый из методов интенсификации основывается на определенных физико-химических эффектах.

Анализируя рис. 1.1, необходимо отметить, что три метода интенсификации предполагают какие-либо периодические процессы, протекающие в ХТС. Наложение колебаний возможно как на элементы ТО,

**ТАК И НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ СРЕДУ. КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТО ЧАСТО НАЗЫВАЮТ ВИБРАЦИЯМИ [17], КОЛЕБАНИЯ В ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДЕ – АКУСТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ ИЛИ ВОЛНАМИ [1].**

Метод интенсификации ХТП за счет дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) базируется на полезном использовании физических эффектов, возникающих в парожидкостных средах при быстром изменении внешнего давления. Реализация этого метода предполагает существование или создание большого количества пузырьков, равномерно распределенных в жидкой фазе. При резком повышении давления в системе каждый пузырек сжимается, а потом схлопывается, выделяя импульс высокого давления в форме сферической ударной волны, или, если вблизи находится жесткая поверхность, образует кумулятивную микроструйку в направлении этой поверхности. В процессе схлопывания пузырька возможна его высокочастотная осцилляция с излучением в окружающую жидкость акустической энергии в ультразвуковом диапазоне. При быстром сбросе внешнего давления возникает эффект взрывного вскипания, сопровождающийся излучением импульса давления большой амплитуды и турбулизацией прилегающих слоев жидкости. Как следствие, в пространстве между пузырьками возникают интенсивные микротечения с высокими мгновенными значениями локальной скорости, ускорения и давления [4, 12, 13].

Множество динамически развивающихся пузырьков можно рассматривать как своего рода микро-трансформаторы, преобразующие аккумулированную в системе потенциальную энергию в кинетическую энергию жидкости, распределенную дискретно в пространстве и во времени.

При реализации метода ДИВЭ используется известный принцип ударного воздействия, который лежит, например, в основе работы оптического лазера или в действии направленного взрыва, – медленное накопление сравнительно небольшого количества энергии и реализация ее в течение короткого времени в малой области пространства. Таким образом, за счет одновременного уменьшения пространственной и временной области локализации энергии достигается существенно высокое значение удельной мощности в зоне обработки.

Независимо от способа практической реализации метода ДИВЭ необходимо выполнение следующих требований:

1 Скорость трансформирования потенциальной энергии в системе должна превышать скорость ее аккумуляции ( $V_m > V_A$ ).

2 Длительность трансформирования энергии должна быть чрезвычайно короткой, поскольку полезная мощность, выделяемая в виде импульса, обратно пропорциональна времени трансформации и прямо пропорциональна величине энергии, аккумуляции за это время ( $N \approx E/t$ ).

3 Энергия в форме импульса должна выделяться одновременно в большом количестве малых локальных зон, равномерно расположенных во всем рабочем объеме аппарата.

Первые два условия накладывают жесткие ограничения на скорость изменения внешнего давления или на скорость ввода энергии, которая должна быть максимально высокой. Длительность изменения давления в системе определяется технологическими и конструктивными возможностями используемого оборудования. Длительность трансформирования энергии зависит от свойств самой системы – теплофизических характеристик компонентов, режимных параметров и концентрации пузырьков.

### 1.1.4 Эффективность пульсационных методов интенсификации ХТП

Рассматривая методы энергетического воздействия и формы организации ХТП, необходимо отметить, что наименьшие энергетические затраты при реализации воздействия будут при пульсационной (импульсной) форме реализации процесса.

Приведем несколько доказательств подтверждения эффективности пульсационной формы организации химико-технологических процессов. Если входящие в уравнение массопереноса величины  $X = \{M, \beta, S, C\}$  представить как сумму осредненных на отрезке времени  $t$  составляющих  $\bar{X}$  и отклонений от них  $\Delta X$  [12, 13]:

$$X = \bar{X} + \Delta X(t), \quad \bar{X} = \frac{1}{t} \int_t \Delta X dt, \quad (1.12)$$

то после осреднения получаем

$$\bar{M} = \bar{\beta} \bar{S} \bar{C} + \overline{\beta(\Delta S \Delta C)} + \overline{S(\Delta \beta \Delta C)} + \overline{C(\Delta \beta \Delta S)} + \overline{(\Delta \beta \Delta S \Delta C)}. \quad (1.13)$$

Знак черты означает осреднение по времени,  $\Delta$  – макроотклонение от среднего значения.

При стационарной организации процесса, его производительность определяется первым слагаемым правой части, так как все остальные слагаемые будут равны нулю. Пульсационная форма организации ХТП способствует перераспределению и концентрации энергии в пространстве и времени, видовой трансформации воздействий (механического в тепловое, акустического в механическое и т.д.), повышению производительности за счет формальной пульсационной организации процесса [13, 18].

Пульсационная форма организации ХТП способствует оптимизации концентрации энергии в ХТС. Удельная энергия  $i$ -й фазы и всей ХТС определяется тремя составляющими: внутренней энергией  $U$ , кинетической энергией макродвижения  $E_k$  и кинетической энергией пульсационного движения  $E_n$  [19]:

$$E = U + E_k + E_n.$$

Для двухфазной системы:

$$\rho U = \rho_1 U_1 + \rho_2 U_2; \quad \rho E_n = \rho_1 E_{n1} + \rho_2 E_{n2}; \quad \rho E_k = \frac{m}{2} \rho_1 V_1^2 + \frac{m}{2} \rho_2 V_2^2. \quad (1.14)$$

Таким образом, анализируя уравнения (1.14) можно сделать вывод, что общая удельная энергия для соответствующей фазы и для всей ХТС больше для импульсного потока, чем для стационарного. Интенсивность ХТП во многом определяется энергетическим потенциалом ХТС.

## 1.2 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

### 1.2.1 Основные понятия

Под *воздействием* на обрабатываемую среду (физико-химическую систему) будем понимать направленное проявление сил различных физических полей: механических, электрических, магнитных, тепловых, акустических и радиационных (сводка основных воздействий и их результатов дана в табл. 1.1).

Воздействие всегда направлено на некоторый материальный объект, которым может быть отдельный элемент или совокупность взаимосвязанных элементов, образующих определенную систему. Результаты воздействия – это *физико-химические эффекты* (ФХЭ), проявляющиеся в элементах системы, на которые направлены определенные воздействия.

Различают такие виды воздействий, как: *акустические, электрические, магнитные, тепловые, механические, радиационные, химические*. Некоторые из этих воздействий взаимосвязаны друг с другом, например, электрические и магнитные воздействия.

#### 1.1 Классификация энергетических воздействий на ХТП

| Виды воздействий | Факторы воздействий  | Физико-химические эффекты  | Результаты воздействия  |
|------------------|--|--|---|
| Механические     | Удар, сдвиг, сжатие, растяжение, вибрация, формирование потоков с определенной траекторией, скоростью и ускорением | Гидроудар, турбулентность, эффект Кармана, трибоэффект, эффект Рейнольдса, автоколебания, активация, накопление дефектов структуры, концентрация напряжений                    | Пульсации давления и скорости потока жидкости, трансформация кинетической энергии в потенциальную и др., энергетическая накачка                   |
| Акустические     | Упругие и квазиупругие колебания в жидкости  | Акустические волны, акустическая турбулентность, кавитация, кумулятивный эффект, звукохимические реакции, резонанс, расклинивающее давление, автоколебания, капиллярный эффект | Пульсации давления, кумулятивный удар, изменение физико-химических свойств, активация, трансформация акустической энергии в механическую, сонолиз |

|               |  |   |  |
|---------------|--|---|--|
| Электрические | Электрические поля различной структуры | Электросепарация, электрофорез, электроосмос, эффект Юткина, электрокоагуляция, электрохимические эффекты, электронгрев | Изменение физико-химических параметров, трансформация электроэнергии в механическую, тепловую, электрическую, химическую и др. энергии |
|---------------|--|---|--|

**ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛ. 1.1**

| Виды воздействий        | Факторы воздействий  | Физико-химические эффекты   | Результаты воздействия  |
|-------------------------|--|---|---|
| Магнитные               | Магнитные поля различной структуры   | Эффект Риги-Ледюка, магнитосепарация, магнитогидродинамический эффект, магнитохимические эффекты            | Изменение физико-химических параметров, трансформация магнитной энергии в механическую, тепловую, электрическую и др. энергии                                   |
| Тепловые                | Нагрев, охлаждение (тепловые потоки)   | Теплопередача, теплопроводность, тепловое излучение, конвекция, эффект Соре, эффект Марангони, термоэффекты | Кипение, конденсация, фазовые переходы, инверсия фаз, изменение физико-химических параметров, трансформация тепловой энергии в механическую, радиационную и др. |
| Световые и радиационные | Электромагнитные волны, инфракрасное, световое, ультрафиолетовое, рентгеновское, $\gamma$ -излучение | Ионизация, энергетическая накачка, фотохимические реакции, возбуждение молекул                              | Изменение физико-химических свойств вещества, активация, излучение, трансформация энергии излучения в тепловую и др.  |

## **ВСЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ВЕЩЕСТВА, МОЖНО РАЗДЕЛИТЬ НА ЧЕТЫРЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ УРОВНЯ [2]:**

- 1) СОВОКУПНОСТЬ ЯВЛЕНИЙ НА АТОМАРНО-МОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЕ; ЭФФЕКТЫ В МАСШТАБЕ НАДМОЛЕКУЛЯРНЫХ ИЛИ ГЛОБУЛЯРНЫХ СТРУКТУР;**
- 2) МНОЖЕСТВО ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ДВИЖЕНИЕМ ЕДИНИЧНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ, С УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ И ЯВЛЕНИЙ МЕЖФАЗНОГО ЭНЕРГО- И МАССОПЕРЕНОСА;**
- 3) ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АНСАМБЛЕ ВКЛЮЧЕНИЙ, ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ СТЕСНЕННЫМ ОБРАЗОМ В ПОТОКЕ ОСНОВНОЙ ФАЗЫ;**
- 4) СОВОКУПНОСТЬ ПРОЦЕССОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ МАКРОГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ ОБСТАНОВКУ В МАСШТАБЕ АППАРАТА.**

При энергетическом воздействии на обрабатываемую среду протекают различные физико-химические процессы, сопровождающиеся какими-либо эффектами. Результаты воздействия – это эффекты, проявляющиеся в жидкости, газе, твердых телах или в гетерогенной смеси. При постоянстве условий, вида воздействия и свойств обрабатываемой среды проявляются одни и те же результаты воздействия.

### **1.2.2 Виды энергетических воздействий**

#### *Акустическое воздействие*

Акустическое воздействие представляет собой распространение в обрабатываемой среде упругих или квазиупругих колебаний [1]. Акустические колебания различают на инфразвуковые (частота  $f < 20$  Гц), звуковые ( $20 \text{ Гц} \leq f \leq 20 \cdot 10^3$  Гц), ультразвуковые ( $20 \cdot 10^3 \text{ Гц} < f \leq 20 \cdot 10^8$  Гц), гиперзвуковые ( $f > 20 \cdot 10^8$  Гц). Для применения в промышленности наиболее часто используются колебания с частотами звукового и ультразвукового диапазонов.

В гидромеханических процессах акустические волны интенсифицируют такие процессы как: отстаивание, флотация, осаждение, диспергирование, эмульгирование, перемешивание, пеногашение, дегазация. В тепловых процессах – нагревание, охлаждение, выпаривание, испарение, горение. В массообменных процессах – кристаллизацию, сушку, растворение, набухание, абсорбцию, адсорбцию, экстракцию, выщелачивание. В механических процессах – экструдирование, литье, формование, диспергирование [20].

В зависимости от заложенного в принцип работы физического эффекта, различают следующие виды акустических излучателей: пьезоэлектрические, магнитострикционные, электродинамические, гидродинамические [1, 20 – 27].

Акустическое воздействие вызывает такие физико-химические эффекты как:

- 1) *акустические волны* – периодическое изменение давления в каждой точке жидкости;
- 2) *акустическая турбулентность* – пульсации скорости и давления жидкости при ее течении за счет акустического давления;
- 3) *кавитация* – разрыв сплошности жидкости под действием растягивающих напряжений, приводящих к образованию пузырьков, наполненных газом и паром;
- 4) *кумулятивный эффект* – усиленное в определенном направлении импульсное динамическое воздействие, например, схлопывание кавитационного пузырька с выбросом в определенном направлении микроструйки жидкости;
- 5) *звукохимические реакции* – химические превращения вещества под действием акустического поля (сонолиз);
- 6) *резонанс* – возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынужденных колебаний с собственной частотой колебательной системы.

При акустическом воздействии происходит инициирование других воздействий – механического, теплового, химического.

## Электрическое воздействие

Электрическое воздействие осуществляется за счет электрических полей различной структуры: постоянные (однородные и неоднородные); переменные (бегущие); скрещивающиеся (электрические и магнитные) [28]. ХТП с использованием электрических полей можно разделить на процессы, которые осуществляются только за счет электрического поля (электродиализ, электроосмос и т.д.), и процессы, которые интенсифицируются электрическим полем (сушка, экстракция, кристаллизация и т.п.).

Электрические (электромагнитные) поля характеризуются частотой (промышленные частоты – 50 Гц, 60 Гц; поле токов высокой частоты – до 300 МГц; поля токов сверхвысокой частоты – от 0,3 до 30 ГГц), напряжением или силой тока, длительностью воздействия.

Электрическое поле воздействует на дипольные молекулы жидкостей и газов. При этом возникают пондеромоторные силы, вызванные наложением полей, поляризационные заряды, направление которых обусловлено разностью диэлектрической проницаемости среды. Эти силы изменяют поверхностное натяжение жидкостей [29 – 31]. Протекание электрического тока через электролиты приводит к электролизу. В коллоидных системах и капиллярно-пористых телах наблюдаются такие процессы, как электрофорез, электроосмос, электродиализ, электрокоагуляция, ионофорез и др. [28]. Воздействие электрического тока на проводящие среды вызывает их нагрев за счет выделения тепла и пробой при высоких напряжениях [31].

Таким образом, электрическое поле в обрабатываемой среде вызывает следующие физико-химические эффекты:

- 1) *электросепарация* – разделение гетерогенной среды за счет разности электропроводности фаз;
- 2) *электрофорез* – перенос частиц в электрическом поле вследствие наличия разноименных зарядов у твердой и жидкой фаз;
- 3) *электроосмос* – перемещение жидкости вдоль стенок капилляра под действием приложенной ЭДС;
- 4) *эффект Юткина* (электрогидравлический удар) – генерация ударных волн в жидкости при ее электрическом пробое [32];
- 5) *электрокоагуляция* – процесс сближения и укрупнения взвешенных в жидкости или газе частиц под действием электрического поля;
- 6) *электрохимические эффекты* – химические превращения под действием электрического тока (электролиз);
- 7) *электронагрев* – выделение тепла за счет прохождения через обрабатываемую среду электрического тока.

При электрическом воздействии на жидкость возможно его преобразование в механическое, тепловое, химическое, акустическое, магнитное и радиационное воздействия.

## Магнитное воздействие

Магнитное воздействие аналогично электрическому. Действие магнитного поля вызывает уменьшение электрической проводимости, возрастание плотности, вязкости, поверхностного натяжения, диэлектрической проницаемости, магнитной восприимчивости [33 – 35]. Под действием магнитного поля меняются свойства воды и водных растворов [34]. Магнитное воздействие является, в основном, оптимизирующим для ХТП и вызывает относительное движение фаз в обрабатываемой среде. Если дисперсной фазой являются ферромагнитные частицы, то они движутся за счет силы  $G_{\text{ми}}$  и возможна их агрегация. Если дисперсная фаза – газовые пузырьки, то происходит их взаимодействие с ионами, что вызывает их коагуляцию, всплытие, дегазацию. Если дисперсная фаза – неферромагнитные частицы, то изменяется условие их движения [33].

Магнитное поле вызывает такие эффекты, как:

- 1) *эффект Риги-Ледюка* – увеличение теплопроводности среды в магнитном поле;
- 2) *магнитосепарация* – разделение гетерогенной среды за счет разности магнитопроизводительности фаз;

3) *магнитогидродинамический эффект* – возникновение электрического тока в замкнутой цепи при движении электропроводной жидкости в магнитном поле;

4) *магнитофизикохимические эффекты* – изменение свойств обрабатываемой среды за счет омагничивания.

### Тепловое воздействие

Тепловое воздействие на обрабатываемую среду осуществляется, как правило, за счет передачи теплоты от теплоносителя. Теплоноситель может быть подведен как через разделяющую стенку, так и непосредственно в жидкость или газ. Нагревание жидкости может быть также произведено за счет других видов воздействий – акустического, механического, электромагнитного и радиационного. Процессы, скорость протекания которых определяется скоростью подвода или отвода теплоты, называют тепловыми. Тепловой процесс может быть реализован как нагреванием, так и охлаждением.

Перенос теплоты является сложным процессом, поэтому при исследовании тепловых процессов их разделяют на более простые явления [36]. Различают три вида переноса теплоты: теплопроводность, тепловое излучение и конвекция. При теплопроводности перенос теплоты происходит путем непосредственного соприкосновения между микрочастицами (молекулами, атомами, электронами). Явление теплового излучения – это процесс распространения энергии с помощью электромагнитных колебаний. Конвекция состоит в том, что перенос теплоты осуществляется вследствие движения и перемешивания макроскопических объемов фазы. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью.

Тепловое воздействие на вещества вызывает следующие эффекты:

1) *кипение* – образование парогазовых пузырьков в жидкости;

2) *фазовый переход* – изменение фазового состояния вещества;

3) *инверсия фаз* – переход дисперсной фазы в сплошную и наоборот (при концентрациях фаз, близких к предельным);

4) *эффект Соре* (термическая диффузия) – перенос вещества за счет теплопроводности;

5) *термоэффекты* – изменение физико-химических свойств веществ за счет нагревания или охлаждения;

6) *эффект Марангони* – непостоянство коэффициента поверхностного натяжения в зависимости от температуры или концентрации вещества;

7) *структурообразование* – формирование регулярных структур за счет тепловых потоков (например, ячейки Бенара).

### Механическое воздействие

Под механическим воздействием будем понимать непосредственно механическое воздействие твердых тел на обрабатываемую среду и в ней содержащиеся частицы. Наряду с тепловыми, электрическими, акустическими и другими видами энергетических воздействий, механическое воздействие на вещества может считаться эффективным средством повышения активности веществ, ускоряя химические и массообменные процессы [37]. *Механическая активация* – это процесс поглощения веществом части подводимой механической энергии, которая, накапливаясь в веществе, меняет его свойства и стимулирует физико-химические процессы. Наиболее эффективна механическая активация за счет свободного удара (в том числе гидравлического) и напряжений трения.

Механические воздействия делятся на три класса:

– линейные перегрузки;

– вибрационные воздействия;

– ударные воздействия.

*Линейными перегрузками* называют кинематические воздействия, возникающие при ускоренном движении источника колебаний. Например, в транспортных машинах при изменении скорости и ускорения.

*Вибрационные воздействия* являются колебательными процессами. Вибрационные воздействия делятся на стационарные, нестационарные и случайные. Простейшим видом стационарного вибрационного воздействия является гармоническое воздействие.



Высокочастотные вибрационные воздействия могут передаваться объекту не только через элементы механических соединений его с источником, но и через окружающую среду (воздух, воду). Такие воздействия называются акустическими.

Случайные вибрационные возбуждения не являются полностью предсказуемыми как гармоническое или полигармоническое воздействия. Стохастический сигнал не может быть представлен графически наперед заданным, так как он обусловлен процессом, содержащим элемент случайности.

*Ударными* называют кратковременные механические воздействия, в которых максимальные значения сил являются весьма большими. Функцию, выражающую зависимость силы, момента силы или ускорения при ударе от времени, называют формой удара. Основными характеристиками формы являются длительность удара и его амплитуда.

Механическое воздействие вызывает такие физико-химические эффекты, как:

1) *турбулентность* – интенсивное перемешивание жидкости, пульсации скорости и давления в жидкости при ее течении;

2) *гидроудар* – результат резкого изменения давления в жидкости, вызванный изменением скорости ее течения;

3) *эффект Кармана* (вихреобразование) – периодический срыв вихрей при обтекании тела потоком жидкости;

4) *трибоэффект* – преобразование механической энергии в тепловую при относительном движении тел и фаз;

5) *эффект Рейнольдса* – увеличение тепломассоотдачи за счет увеличения скорости потока;

6) *автоколебания* – возникновение колебаний в системе за счет преобразования энергии постоянного движения в колебательную.

### ***Радиационное воздействие***

Радиационное воздействие на обрабатываемую среду осуществляется электромагнитными волнами длинами менее 10 мм и потоками частиц больших энергий. К радиационному воздействию относится также оптическое воздействие. Указанный спектр волн включает в себя электромагнитные волны, начиная с частоты  $10^{10}$  Гц, инфракрасной, видимой, ультрафиолетовой области и рентгеновского излучения, заканчивая гамма-излучением с частотой  $10^{19}$  Гц [1].

В этом диапазоне свет проявляет как корпускулярные, так и волновые свойства. Радиационное воздействие включает как электромагнитное (рентгеновское и  $\gamma$ -излучение), так и корпускулярное излучение (ускоренные электроны, быстрые заряженные частицы). Источниками радиационного воздействия служат радиоактивные изотопы и специальные ускорители частиц.

Эффект от радиационного воздействия зависит от длины волны и от типа радиационного воздействия. Длинноволновое излучение вызывает в основном нагрев обрабатываемых веществ, а коротковолновая часть спектра может вызвать фотохимические реакции. Потоки заряженных частиц производят ионизацию и возбуждение молекул облучаемого вещества при столкновениях, а при облучении нейтральными частицами или фотонами, в основном, первоначально образуются заряженные частицы, которые осуществляют ионизацию и возбуждение молекул. Для количественной оценки воздействия ионизирующего излучателя на вещество используют ряд специальных характеристик [38, 39].

### ***Химическое воздействие***

Химическое воздействие на обрабатываемую среду осуществляется за счет внесения веществ или прохождения обрабатываемой среды через вещества, которые вызывают изменение ее физико-химических свойств, инициируют или ускоряют химические реакции (катализаторы), вступают в химическое взаимодействие с самой обрабатываемой средой или с ее компонентами. Химическое воздействие относится к сфере фундаментальных химических наук и более детальное рассмотрение механизма этого вида воздействия здесь нецелесообразно.

Таким образом, можно сделать вывод, что механическое, акустическое, электрическое, магнитное, тепловое и радиационное воздействия существенным образом влияют на процессы в обрабатываемой

среде, инициируя различные физико-химические эффекты и изменяя физико-химические свойства фаз и содержащихся в них включений. Перечисленные воздействия принято называть энергетическими, так как их реализация приводит к изменению энергетического состояния обрабатываемой среды. Воздействуя на обрабатываемую среду за счет одного вида воздействий, возможна трансформация его в другой вид воздействия как полностью, так и частично. Все виды воздействий взаимосвязаны друг с другом, и реализовать какой-то вид воздействия в чистом виде практически невозможно.

### 1.2.3 Закономерности энергетических воздействий

**АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ФХЭ, ПРОЯВЛЯЮЩИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭТИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ПОЗВОЛИЛ ВЫЯВИТЬ СЛЕДУЮЩИЕ ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ [10]:**

**1 ПРИ ОДНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СИСТЕМУ МОЖЕТ ПРОЯВЛЯТЬСЯ НЕСКОЛЬКО РЕЗУЛЬТАТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ. ИХ ЧИСЛО ЗАВИСИТ ОТ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ. ЧЕМ БОЛЕЕ СЛОЖНА ПО СВОЕЙ СТРУКТУРЕ СИСТЕМА, ТЕМ БОЛЬШЕЕ ЧИСЛО РЕЗУЛЬТАТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ В НЕЙ ПРОЯВЛЯЕТСЯ. ИЗМЕНЯЯ ЧИСЛО И СОСТАВ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ПРИ ЗАДАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ, МОЖНО ПОЛУЧАТЬ НЕОБХОДИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ. ИЗМЕНЯЯ ВИД ВОЗДЕЙСТВИЯ И КОМБИНИРУЯ МЕЖДУ СОБОЙ РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ТАКЖЕ МОЖНО ПОЛУЧИТЬ НЕОБХОДИМЫЙ РЕЗУЛЬТАТ ВОЗДЕЙСТВИЯ. ПОСКОЛЬКУ ОТ ОДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МОГУТ ПРОЯВЛЯТЬСЯ ФХЭ НА РАЗНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ УРОВНЯХ СИСТЕМЫ, ТО ВОЗНИКАЮТ ВНУТРЕННИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ, А РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, КАК ПРАВИЛО, КОРРЕЛИРУЮТ С ВНУТРЕННИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ.**

**2 НА ОДНУ СИСТЕМУ МОЖЕТ БЫТЬ ОКАЗАНО НЕСКОЛЬКО ВОЗДЕЙСТВИЙ. ИХ МОЖНО РАЗДЕЛИТЬ НА ОСНОВНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ. ОСНОВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА СИСТЕМУ ЯВЛЯЕТСЯ ТАКОЕ ЦЕЛЕВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, РЕЗУЛЬТАТ КОТОРОГО ВЫЗЫВАЕТ ГЛАВНЫЙ И НЕОБХОДИМЫЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ – ТАКОЕ, КОТОРОЕ ПРИВОДИТ ЛИШЬ К КОЛИЧЕСТВЕННОМУ ИЗМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТА, ПОЛУЧАЕМОГО ОТ ОСНОВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.**

**3 В ОДНОЙ СИСТЕМЕ МОГУТ ПРОЯВЛЯТЬСЯ НЕСКОЛЬКО ФХЭ. ЕСЛИ КАКОЕ-ЛИБО ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИВОДИТ К НОВОМУ РЕЗУЛЬТАТУ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ТО В СИСТЕМЕ ПРОЯВЛЯЮТСЯ ДВА ИЛИ БОЛЕЕ РАЗЛИЧНЫХ ФХЭ. ЛЮБЫЕ ДВА ИЛИ БОЛЕЕ ФХЭ, ПРОЯВЛЯЮЩИЕСЯ В ОДНОЙ СИСТЕМЕ, ОКАЗЫВАЮТ ВЛИЯНИЕ ДРУГ НА ДРУГА.**

**4 РЕЗУЛЬТАТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕГУЛИРУЕТСЯ И ОБУСЛОВЛИВАЕТСЯ СЛЕДУЮЩИМИ ФАКТОРАМИ: КОЛИЧЕСТВЕННЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ ВОЗДЕЙСТВИЯ; ВВЕДЕНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ; ВВЕДЕНИЕМ ЕЩЕ ОДНОГО ОСНОВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ; ИЗМЕНЕНИЕМ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ; ИЗМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ.**

**5 ПРИ ПОСТОЯНСТВЕ УСЛОВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЙ И СВОЙСТВ СИСТЕМЫ ПРОЯВЛЯЮТСЯ ОДНИ И ТЕ ЖЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ОДНИ И ТЕ ЖЕ ЗНАЧЕНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ.**

**СОСТАВИМ СХЕМУ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ СРЕДУ (РИС. 1.2). ОСНОВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ГЕНЕРИРУЕТСЯ СПЕЦИАЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ КОНКРЕТНОГО ВИДА ВОЗДЕЙСТВИЙ (АКУСТИЧЕСКОГО, ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И Т.П.). ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ – ЭТО ВОЗДЕЙСТВИЕ, КОТОРОЕ МОЖЕТ ГЕНЕРИРОВАТЬСЯ СПЕЦИАЛЬНО ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ОСНОВНОГО ИЛИ ЯВЛЯЕТСЯ ПОБОЧНЫМ ПРИ РАБОТЕ УСТРОЙСТВА (АППАРАТА) ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ОСНОВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ. НАПРИМЕР, ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЯВЛЯЕТСЯ ТЕПЛОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗА СЧЕТ НАГРЕВА РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗЛУЧАТЕЛЯ. КАЖДОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ (ОСНОВНОЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ) НЕОБХОДИМО ВЫДЕРЖИВАТЬ В ОПРЕДЕЛЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ (ОПТИМИЗАЦИЯ) НАИБОЛЕЕ БЛАГОПРИЯТНЫХ ДЛЯ**

**ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХТП. ОПТИМИЗАЦИЮ НЕОБХОДИМО ПРОВОДИТЬ КАК ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ТАК И ПО ВИДАМ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ. В ПРОЦЕССЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЗМОЖНЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, И ПОЭТОМУ КРОМЕ ОПТИМИЗАЦИИ НЕОБХОДИМО ПРЕДУСМОТРЕТЬ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ВОЗДЕЙСТВИЙ: КАКОЕ ИЗ ВОЗДЕЙСТВИЙ ВЫБРАТЬ ЗА ОСНОВНОЕ, КАКОЕ ЗА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ, КАК ВЫБРАТЬ ИХ ПАРАМЕТРЫ, И КАК ИЗБЕЖАТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕНУЖНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.**

**ОБРАБАТЫВАЕМАЯ СРЕДА НАХОДИТСЯ ИЛИ ПРОХОДИТ ЧЕРЕЗ ТО, В КОТОРОМ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ХТП. ПОТОКИ И ОБЪЕМ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДЫ ОГРАНИЧЕНЫ И НАПРАВЛЯЮТСЯ КОНСТРУКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ АППАРАТА. ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХТП ЗА СЧЕТ КАКИХ-ЛИБО ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ БЫЛА МАКСИМАЛЬНОЙ, НЕОБХОДИМА ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТО. В СВОЮ ОЧЕРЕДЬ, ХТП ХАРАКТЕРИЗУЕТСЯ ОПРЕДЕЛЕННЫМИ РЕЖИМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ, КОТОРЫЕ НЕОБХОДИМО ОПТИМИЗИРОВАТЬ И ПОСТОЯННО ПОДДЕРЖИВАТЬ НА ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ. СВОДКА ХАРАКТЕРИСТИК ХТП ДЛЯ РЯДА ПРОЦЕССОВ ДАНА В ТАБЛ. 1.2.**



**ВОЗДЕЙСТВИЯ, НАЛОЖЕННЫЕ НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ СРЕДУ, ВЫЗЫВАЮТ В НЕЙ РАЗЛИЧНЫЕ ФХЭ, КОТОРЫЕ ИЗМЕНЯЮТ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ, ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ. НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНЫМ БУДЕТ ВОЗДЕЙСТВИЕ, СКОНЦЕНТРИРОВАННОЕ В НЕУСТОЙЧИВЫХ ТОЧКАХ СТРУКТУРЫ ВЕЩЕСТВА. ЧАСТО ИМИ ЯВЛЯЮТСЯ МЕЖФАЗНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ, ДЕФЕКТЫ СТРУКТУРЫ, ДИСЛОКАЦИИ, ВНУТРЕННИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ (КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ). ТАКОВЫ, НАПРИМЕР, ЦЕНТРЫ-ЗАРОДЫШИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ВИХРЕЙ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ (КОНДЕНСАЦИИ/КИПЕНИЯ, КРИСТАЛЛИЗАЦИИ/ПЛАВЛЕНИЯ И ПР.).**

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ДОЛЖНО БЫТЬ СКОНЦЕНТРИРОВАННЫМ, ОТДАВАТЬ БОЛЬШОЕ КОЛИЧЕСТВО ЭНЕРГИИ ЗА МАЛЫЙ ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ (КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВО ВРЕМЕНИ). ЭТИ ДВА ПРИНЦИПА РЕАЛИЗОВАНЫ В КОНЦЕПЦИИ ДИСКРЕТНО-ИМПУЛЬСНОГО ВВОДА ЭНЕРГИИ [12, 13]. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ПОЗВОЛЯЕТ ПОЛУЧИТЬ БОЛЬШУЮ МОЩНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, СОВЕРШИТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ НАКАЧКУ (ОСОБЕННО В РЕЖИМЕ РЕЗОНАНСА), ВЫСВОБОДИТЬ ВНУТРЕНнюю ЭНЕРГИЮ ВЕЩЕСТВА, ИНИЦИИРОВАТЬ МНОГОЧИСЛЕННЫЕ КВАНТОВЫЕ, КАТАЛИТИЧЕСКИЕ, ЦЕПНЫЕ, САМОПРОИЗВОЛЬНЫЕ, ЛАВИНООБРАЗНЫЕ И ДРУГИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ [1, 10, 14, 15, 21, 32 – 42, 50, 51].**

**КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФХЭ ЗАВИСЯТ ОТ ВИДА ВОЗДЕЙСТВИЯ, КОМБИНАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ИХ ПАРАМЕТРОВ. ФИЗИКО-**

**ХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИВОДЯТ К ИЗМЕНЕНИЮ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ И КАЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ХТП. ЕСЛИ ВИД ОСНОВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, ЕГО КОМБИНАЦИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ БЫЛИ ВЫБРАНЫ ПРАВИЛЬНО, ТО ПРОИСХОДИТ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХТП. СТЕПЕНЬ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХТП ЗАВИСИТ ОТ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЖДОГО ВИДА ВОЗДЕЙСТВИЙ.**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, В СВОЮ ОЧЕРЕДЬ, ТРАНСФОРМИРУЮТ ОДИН ВИД ВОЗДЕЙСТВИЯ В ДРУГОЙ, КОТОРЫЙ ТАКЖЕ ДЕЙСТВУЕТ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ. В КАЧЕСТВЕ ПРИМЕРА МОЖНО ПРИВЕСТИ АКУСТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, КОТОРОЕ ВЫЗЫВАЕТ В ЖИДКОСТИ КАВИТАЦИЮ. КАВИТАЦИОННЫЕ ПУЗЫРЬКИ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ВЫБРАСЫВАЮТ КУМУЛЯТИВНЫЕ СТРУЙКИ, ПРОИЗВОДЯ МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КОМПОНЕНТЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ ЖИДКОСТИ. ПРАКТИЧЕСКИ ВСЕГДА, ПРИ ЛЮБОМ ВИДЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ ПРОИСХОДИТ ВЫДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА, Т.Е. ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ. НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ ЭФФЕКТАМИ ЧАСТО НЕВОЗМОЖНО. ОБЫЧНО ВОЗМОЖНО ТОЛЬКО ОПОСРЕДОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЧЕРЕЗ КОНСТРУКТИВНЫЕ И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ВХОДНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ.**

**ВХОДНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ (ОСНОВНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ), КОНСТРУКТИВНЫЕ И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ХТС, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И ИХ ВТОРИЧНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СУММИРУЮТСЯ В РЕЗУЛЬТАТАХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ХТС. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЙ ТАКЖЕ МОЖНО РАЗБИТЬ НА ОСНОВНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ. ОСНОВНЫЕ – ЭТО ТЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, КОТОРЫЕ ПЛАНИРОВАЛОСЬ ПОЛУЧИТЬ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ – РЕЗУЛЬТАТЫ, КОТОРЫЕ СОПУТСТВУЮТ ОСНОВНЫМ И МОГУТ БЫТЬ КАК ПОЛЕЗНЫМИ, ТАК И НЕЙТРАЛЬНЫМИ И ДАЖЕ ВРЕДНЫМИ. ТИПИЧНЫМ ПРИМЕРОМ ЯВЛЯЕТСЯ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЕ, КОТОРОЕ ПРОИСХОДИТ В РЕЗУЛЬТАТЕ МНОГИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И МОЖЕТ БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАНО КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ИЛИ ВТОРИЧНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ.**

**СОВОКУПНОСТЬ ОСНОВНЫХ, ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ И ВТОРИЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ СОСТАВЛЯЕТ СИСТЕМУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ СРЕДУ. ПРАВИЛЬНЫЙ ВЫБОР, ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ СРЕДУ ОПРЕДЕЛЯЮТ СТЕПЕНЬ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХТП. ГЛАВНЫМ ОБЪЕКТОМ АНАЛИЗА ПРИ ПОИСКЕ ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЯВЛЯЕТСЯ НЕ САМ ПРОЦЕСС, А ЕГО МЕХАНИЗМ. ЧЕМ БОЛЕЕ ПОДРОБНО ОБЩИЙ МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА БУДЕТ РАСЧЛЕНЕН НА ЧАСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ДЕТАЛИ, ТЕМ БОЛЕЕ ТОЧНО МОЖЕТ БЫТЬ УСТАНОВЛЕНО ЛИМИТИРУЮЩЕЕ ЗВЕНО МЕХАНИЗМА И БОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНО ВЫБРАНО СООТВЕТСТВУЮЩЕЕ ЭТОМУ ЗВЕНУ ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ.**

### 1.3. Методика интенсификации ХТП импульсными энергетическими воздействиями

#### 1.3.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХТП

Методика интенсификации ХТП при импульсных энергетических воздействиях базируется на синергетическом подходе. *Синергетичность* означает совместные, кооперативные действия, дающие новый качественный эффект [43]. 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 второго 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 пе-

реход к турбулентному режиму течения, что резко ускоряет процесс растворения. Эффективность совместных парных взаимодействий основного, дополнительного и вторичного воздействий для ряда процессов показана в табл. 1.3.

### 1.3 СОВМЕСТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ОЦЕНКА ИХ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ХТП РАСТВОРЕНИЯ, ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ, ДИСПЕРГИРОВАНИЯ, ЭКСТРАГИРОВАНИЯ

| <i>Растворение</i>     |    |                                   |    |    |    |    |   |
|------------------------|----|-----------------------------------|----|----|----|----|---|
| Воздействия            |    | <i>Дополнительные и вторичные</i> |    |    |    |    |   |
|                        |    | А                                 | Э  | Мг | Мх | Т  | Р |
| Основное               | А  | +                                 | ++ | +  | +  | +  | + |
|                        | Э  | ++                                | +  | +  | +  | ++ | + |
|                        | Мг | +                                 | ++ | +  | +  | +  | + |
|                        | Мх | +                                 | +  | +  | +  | +  | + |
|                        | Т  | +                                 | ++ | +  | +  | +  | + |
|                        | Р  | +                                 | +  | +  | +  | ++ | + |
| <i>Эмульгирование</i>  |    |                                   |    |    |    |    |   |
| Воздействия            |    | <i>Дополнительные и вторичные</i> |    |    |    |    |   |
|                        |    | А                                 | Э  | Мг | Мх | Т  | Р |
| Основное               | А  | +                                 | -  | -  | ++ | +  | + |
|                        | Э  | +                                 | +  | -  | +  | +  | + |
|                        | Мг | +                                 | -  | +  | +  | +  | + |
|                        | Мх | ++                                | -  | -  | +  | +  | + |
|                        | Т  | +                                 | -  | -  | +  | +  | + |
|                        | Р  | +                                 | -  | -  | +  | +  | + |
| <i>Диспергирование</i> |    |                                   |    |    |    |    |   |
| Воздействия            |    | <i>Дополнительные и вторичные</i> |    |    |    |    |   |
|                        |    | А                                 | Э  | Мг | Мх | Т  | Р |
| Основное               | А  | +                                 | +  | +  | +  | +  | + |
|                        | Э  | +                                 | +  | +  | +  | +  | + |
|                        | Мг | +                                 | +  | +  | +  | +  | + |
|                        | Мх | +                                 | +  | -  | +  | +  | + |
|                        | Т  | +                                 | +  | +  | +  | +  | + |
|                        | Р  | +                                 | +  | +  | +  | +  | + |
| <i>Экстрагирование</i> |    |                                   |    |    |    |    |   |
| Воздействия            |    | <i>Дополнительные и вторичные</i> |    |    |    |    |   |
|                        |    | А                                 | Э  | Мг | Мх | Т  | Р |
| Основное               | А  | +                                 | ++ | +  | ++ | +  | + |
|                        | Э  | ++                                | +  | +  | +  | ++ | + |
|                        | Мг | +                                 | +  | +  | +  | +  | + |
|                        | Мх | ++                                | ++ | +  | +  | ++ | + |
|                        | Т  | +                                 | +  | +  | +  | +  | + |
|                        | Р  | +                                 | +  | +  | +  | +  | + |

Примечание. «++» – синергетический эффект; «+» – аддитивный эффект; «-» – антагонистический эффект; воздействия: А – акустические; Э – электрические; Мг – магнитные; Мх – механические; Т – тепловые; Р – радиационные.

Аддитивные 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 [44].

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.

Следующий принцип, на котором базируется методика интенсификации ХТП при импульсных энергетических воздействиях – это *принцип концентрационной избирательности*, который 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*) [12, 13, 18, 45]. 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.

Таким образом, основными принципами, на которых базируется методика интенсификации ХТП при импульсных энергетических воздействиях, являются:

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

### 1.3.2 Основные положения методики интенсификации ХТП

Интенсификация ХТП при энергетических воздействиях возможна за счет:

- 1) комбинирования и подбора нужного сочетания воздействий (основных, дополнительных и вторичных);
- 2) оптимизации и управления параметрами энергетических воздействий.

Суммируя все вышесказанное и учитывая поливариантность энергетических воздействий на ХТП, составим алгоритм интенсификации ХТП при энергетических воздействиях (рис. 1.3).

Первым этапом при интенсификации ХТП должен быть системный анализ физической сущности процесса, детальное изучение его механизма, построение физической модели процесса на каждом иерархическом уровне и составление уравнений, описывающих эти процессы.

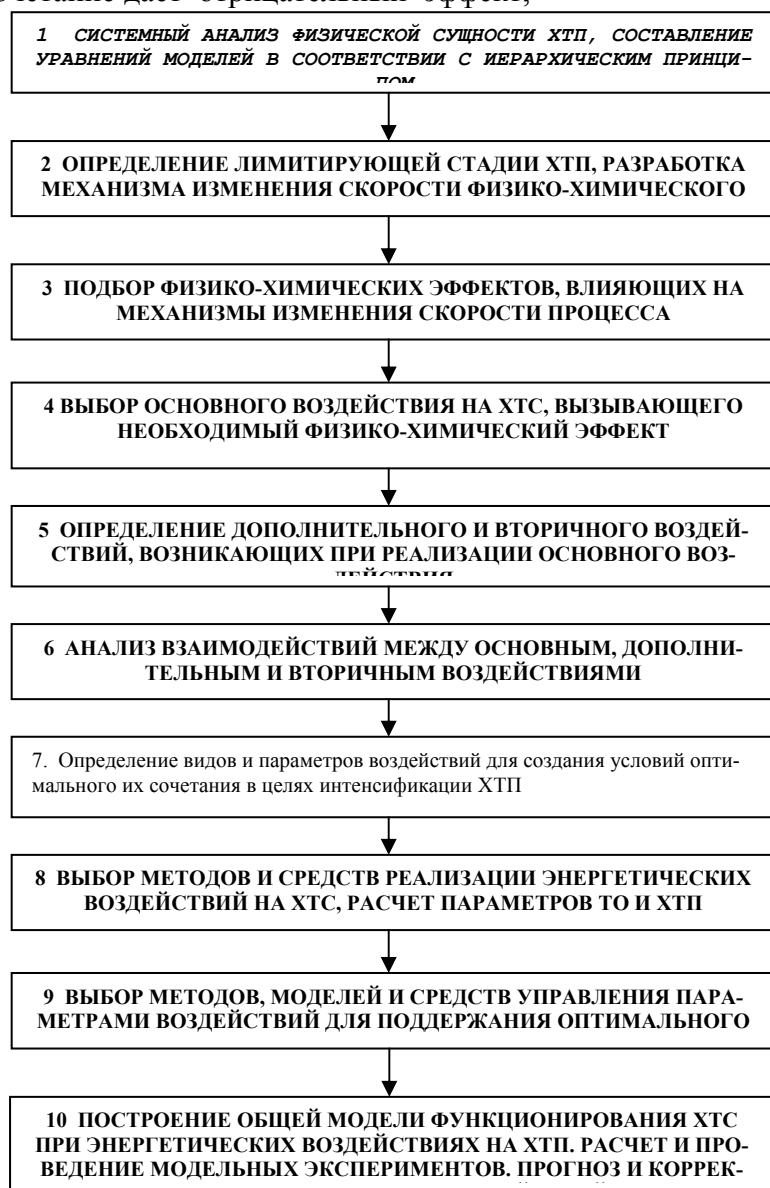
Основываясь на данных системного анализа ХТП, необходимо выявить лимитирующую стадию процесса и определить факторы, способствующие изменению скорости физико-химического процесса на этой стадии. Так, например, если при растворении твердых частиц лимитирующей стадией является процесс переноса вещества из твердой фазы в жидкую фазу, то необходимо интенсифицировать этот процесс ускорением механизма конвективной диффузии, что возможно за счет пульсаций скорости потока жидкости около поверхности частицы. Это может быть достигнуто, например, увеличением турбулентности потока жидкости, инициирования кавитации.

После определения основного механизма изменения скорости физико-химического процесса осуществляется подбор физико-химических эффектов, запускающих этот механизм в действие. Необходимо рассмотреть весь спектр физико-химических эффектов для того, чтобы выявить, какой из факторов воздействия будет оптимальным для инициирования определенного эффекта.



Следующим этапом является выбор вида воздействия для получения требуемого набора или одного физико-химического эффекта. Воздействие, дающее необходимый физико-химический эффект с определенными качественными и количественными параметрами, выбирается за основное воздействие.

После определения основного воздействия выявляют вторичные воздействия и решают, способствуют ли эти вторичные воздействия получению необходимого набора физико-химических эффектов. То есть, является ли сочетание основного и вторичных воздействий положительным и если какое-либо сочетание дает отрицательный эффект,



**Рис. 1.3** Блок-схема алгоритма интенсификации ХТП при импульсных энергетических воздействиях

**ТО НЕОБХОДИМО НАЙТИ СПОСОБ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ЭТОГО ВТОРИЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЖЕТ ПРОЯВЛЯТЬСЯ КАК СОПУТСТВУЮЩЕЕ ОСНОВНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ, И ТОГДА НЕОБХОДИМО ОПРЕДЕЛИТЬ, ЯВЛЯ-**

**ЕТСЯ ЛИ ЭТО СОЧЕТАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ, И ЕСЛИ НЕТ – ТО ОПРЕДЕЛИТЬ СПОСОБЫ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ЭТОГО ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ. ЕСЛИ У ОСНОВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТСУТСТВУЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ТО НЕОБХОДИМО ОПРЕДЕЛИТЬ, ВОЗМОЖНО ЛИ БЕЗ ЧРЕЗМЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАТЕРИАЛЬНЫХ ЗАТРАТ ВВЕСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ЧТОБЫ УСИЛИТЬ ОСНОВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ.**

Выбор комбинации основного, дополнительного и вторичного воздействий является решением задачи на качественном уровне, расчет и оптимизация параметров всех воздействий – это решение задачи интенсификации ХТП на количественном (расчетном) уровне, после которого необходимо произвести выбор метода, моделей и средств управления параметрами воздействий для поддержания оптимального режима функционирования ХТС.

Таким образом, на предыдущих этапах произведены все основные действия для разработки метода и средств энергетических воздействий, выполнен системный анализ функционирования ХТС при энергетических воздействиях на ХТП.

Завершающим этапом в разработке алгоритма интенсификации ХТП является построение общей модели функционирования ХТС, вобравшей в себя информацию и модели физико-химических процессов на каждом иерархическом уровне. Решение такой сложной задачи не может обойтись без упрощений и допущений при разработке модели того или иного процесса и явления. Проектировщик должен найти рациональное сочетание между упрощением модельной схемы и требуемой точностью расчетов. Такая сложная задача требует поэтапного подхода, точного и корректного приближения к работоспособной модели, дающей результат с достаточной для инженерных расчетов точностью. Для этого необходимо проведение реальных и виртуальных (компьютерных) экспериментов с целью уточнения и корректировки параметров модели функционирования ХТС при энергетических воздействиях на ХТП.

На основе инженерных решений и компьютерного моделирования ХТС производится окончательный выбор методов и средств реализации энергетических воздействий на ХТП, расчет параметров ТО и ХТП. Конечный критерий, который определяет правильность выбора моделей, методов и средств интенсификации ХТП – это их промышленная реализация.

Предложенный алгоритм интенсификации ХТП при энергетических воздействиях, естественно, не учитывает всех возможных нюансов при решении конкретных проблем. Этот алгоритм не претендует на всеобъемлемость и полную корректность, но определяет основное направление, в котором необходимо двигаться проектировщику. Предлагаемая методика интенсификации ХТП при импульсных энергетических воздействиях соответствует современным научным методам решения производственных и научных задач.

## **1.4 ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАШИН И АППАРАТОВ С ИМПУЛЬСНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ**

### **1.4.1 Критерии эффективности оборудования и ХТП**

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХТП ПОКАЗЫВАЕТ, ЧТО ИНТЕНСИВНОСТЬ ХТП ЗАВИСИТ ВО МНОГОМ ОТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТО. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛЮБОГО ОБЪЕКТА ВЫРАЖАЕТ СООТНОШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТА И ЗАТРАТ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ДАННОГО РЕЗУЛЬТАТА [46].**

**ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЯЮТ НА ДВЕ ГРУППЫ: КРИТЕРИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ; КРИТЕРИИ СИСТЕМЫ И ПОДСИСТЕМЫ.**

**КРИТЕРИИ РАЗДЕЛЯЮТ ПО СЛЕДУЮЩИМ КЛАССИФИКАЦИОННЫМ ПРИЗНАКАМ:  
– ВИДУ (НАТУРАЛЬНЫЙ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ, ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ, ЭКОНОМИЧЕСКИЙ);**

- СТРУКТУРЕ (АБСОЛЮТНЫЙ, УДЕЛЬНЫЙ, ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ, СВЕРНУТЫЙ);
- УРОВНЮ (ГЛОБАЛЬНЫЙ, ЛОКАЛЬНЫЙ, ОБОБЩЕННЫЙ);
- СЛОЖНОСТИ (ПРОСТЕЙШИЙ, ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ, КОМПЛЕКСНЫЙ); ПРИЛОЖЕНИЮ (ПРЕДПРОЕКТНЫЙ, ПРОЕКТНЫЙ, ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ, ЛИКВИДАЦИОННЫЙ);
- МАСШТАБУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ (ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ОТРАСЛЬ, ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ);
- СРОКУ ДЕЙСТВИЯ (ОПЕРАТИВНЫЙ, ГОДОВОЙ, ДОЛГОСРОЧНЫЙ).

НАТУРАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАИБОЛЕЕ ПРИМЕНИМЫ ПРИ АНАЛИЗЕ НИЗШИХ УРОВНЕЙ СИСТЕМЫ. БОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫМИ ЯВЛЯЮТСЯ ОЦЕНКИ С ПОМОЩЬЮ ЭКОНОМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ [46].

РАССМОТРИМ ОСНОВНЫЕ НАТУРАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ, КОТОРЫЕ ЗАКЛАДЫВАЮТ БАЗУ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ. К НИМ ОТНОСЯТСЯ МАССА, МОЩНОСТЬ, ОБЪЕМ, ГАБАРИТЫ, РАСХОД, ЭНЕРГИЯ, ПЛОЩАДЬ ИЛИ ОБЪЕМ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И Т.П.

ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА УДОБНО ПОЛЬЗОВАТЬСЯ ТАКИМИ ОТНОСИТЕЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ КАК:

- **ОБЩИЙ КПД.**
- **ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ КПД**,  $K_E = E_2/E_1$ , ГДЕ  $E_2$ ,  $E_1$  – ЭКСЕРГИЯ ВХОДЯЩИХ И ВЫХОДЯЩИХ ПОТОКОВ, ДЖ/С [47] (ЭКСЕРГИЯ – МАКСИМАЛЬНАЯ РАБОТА, СОВЕРШАЕМАЯ СИСТЕМОЙ ПРИ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ).
- **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ КПД**,  $K_M = E_{II}/E_P$ , ГДЕ  $E_{II}$ ,  $E_P$  – ИСПОЛЬЗУЕМАЯ И РАСПОЛАГАЕМАЯ ЭКСЕРГИЯ, ДЖ/С.
- **ЭНЕРГОЕМКОСТЬ**,  $E = N/M$ , ВТ/КГ (ВТ/ДЖ), ПОКАЗЫВАЮЩАЯ КОЛИЧЕСТВО ПОТОКА ЭНЕРГИИ НА ЕДИНИЦУ ПЕРЕНЕСЕННОГО ВЕЩЕСТВА ИЛИ ЭНЕРГИИ.
- **МАТЕРИАЛОЕМКОСТЬ**,  $M = G/M$ , КГ/КГ (КГ/ДЖ), ПОКАЗЫВАЮЩАЯ КОЛИЧЕСТВО МАССЫ ТО НА ЕДИНИЦУ ПЕРЕНЕСЕННОГО ВЕЩЕСТВА ИЛИ ЭНЕРГИИ.
- **ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ**,  $Q = M/T$ , КГ/С (ДЖ/С), ПОКАЗЫВАЮЩАЯ ВЕЛИЧИНУ ПОТОКА МАССЫ ИЛИ ЭНЕРГИИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ.
- **ИНДЕКС ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**,  $I = M/M_{\text{СУМ}}$ , ПОКАЗЫВАЮЩИЙ ОТНОШЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ГОТОВОГО ПРОДУКТА  $M$  К ОБЩЕЙ СУММЕ СЫРЬЯ  $M_{\text{СУМ}}$ , ЗАТРАЧЕННОГО НА ПРОИЗВОДСТВО.
- **КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЪЕМА**,  $Y = V_P/V_{\text{АП}}$ , ПОКАЗЫВАЮЩИЙ КАКУЮ ЧАСТЬ ВСЕГО ОБЪЕМА АППАРАТА  $V_{\text{АП}}$  ЗАНИМАЕТ ОБЪЕМ ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОГО ПРОДУКТА  $V_P$ .
- **СТЕПЕНЬ ПРЕВРАЩЕНИЯ**,  $\Phi = M/M_{\text{МАХ}}$ , ПОКАЗЫВАЮЩАЯ ОТНОШЕНИЕ РЕАЛЬНО ПОЛУЧЕННОГО КОЛИЧЕСТВА ПРОДУКТА  $M$  К МАКСИМАЛЬНОМУ ЕГО КОЛИЧЕСТВУ  $M_{\text{МАХ}}$ , КОТОРОЕ МОГЛО БЫТЬ ПОЛУЧЕНО ПРИ ДАННЫХ УСЛОВИЯХ.
- **СЕЛЕКТИВНОСТЬ**,  $F = M_{\text{ЦЕЛ}}/M_{\text{СУМ}}$ , ПОКАЗЫВАЮЩАЯ ОТНОШЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ИСХОДНОГО РЕАГЕНТА  $M_{\text{ЦЕЛ}}$ , РАСХОДУЕМОГО НА ЦЕЛЮЮ РЕАКЦИЮ, К ОБЩЕМУ ЧИСЛУ ИСХОДНОГО РЕАГЕНТА, ПОШЕДШЕГО НА ВСЕ РЕАКЦИИ [48, 49].

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ПРЕДПРОЕКТНОМ ЭТАПЕ НОСЯТ ОЦЕНОЧНЫЙ, ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ ХАРАКТЕР. НА ПРОЕКТНОМ ЭТАПЕ РАСЧЕТ ПРОВОДИТСЯ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ КАПИТАЛЬНЫХ ВЛОЖЕНИЙ В ХТС. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЭТАП ПРЕДУСМАТРИВАЕТ ИЗГОТОВЛЕНИЕ И УСТАНОВКУ ОБЪЕКТА ДЛЯ ВВОДА ЕГО В ЭКСПЛУАТАЦИЮ С ПРОЕКТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ НАИМЕНЬШИХ ЗАТРАТАХ. НА ЭТОМ ЭТАПЕ ГЛАВНУЮ РОЛЬ ОТВОДЯТ ТАКОМУ ЭКОНОМИЧЕСКОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ, КАК СЕБЕСТОИМОСТЬ ОБЪЕКТА. НА ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ЭТАПЕ ОСНОВНОЙ ЗАДАЧЕЙ ЯВЛЯЕТСЯ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ХТС И ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ. ЗДЕСЬ КРИТЕРИЯМИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХТС ЯВЛЯЮТСЯ

**ОБОБЩЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ: АБСОЛЮТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ХТС; СРОК ОКУПАЕМОСТИ КАПИТАЛЬНЫХ ВЛОЖЕНИЙ; ПРИБЫЛЬ; СУММАРНЫЙ РАСХОД И СТОИМОСТЬ ЭНЕРГИИ; РЕАЛЬНЫЙ ГОДОВОЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ. НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ХТС В КАЧЕСТВЕ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКОМЕНДУЕТСЯ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ, УКАЗАННЫЕ ВЫШЕ. ПРИ РАСЧЕТЕ СЕБЕСТОИМОСТИ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ НЕОБХОДИМО ТАКЖЕ УЧИТЫВАТЬ КОНЬЮКТУРУ, ВОЗМОЖНЫЕ РИСКИ, РЕКЛАМНО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАСХОДЫ, УПУЩЕННУЮ ВЫГОДУ И Т.П.**

**ПРИ СРАВНЕНИИ НЕСКОЛЬКИХ РАЗЛИЧНЫХ ХТС ОДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ МОЖНО ПОЛУЧИТЬ РАВНЫЙ РАЗМЕР ПРИБЫЛИ, НО ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭТИХ ХТС МОЖЕТ БЫТЬ РАЗЛИЧНОЙ, ТАК КАК НА ИХ РЕАЛИЗАЦИЮ ПОТРЕБУЮТСЯ РАЗЛИЧНЫЕ ЗАТРАТЫ. НЕОБХОДИМО ТАКЖЕ УЧИТЫВАТЬ ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ ЧИСТОТУ ПРОЕКТА. МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕАЛЬНОГО ПРИВЕДЕННОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА, СРОКА ОКУПАЕМОСТИ, ВНУТРЕННЕЙ НОРМЫ ПРИБЫЛИ, РЕНТАБЕЛЬНОСТИ И ДРУГИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ПРИВОДЯТСЯ ВО МНОГИХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКАХ.**

#### 1.4.2. ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХТП

**ТАКИМ ОБРАЗОМ, ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХТП ИМПУЛЬСНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТО ПРЕДСТАВЛЯЕТСЯ В СЛЕДУЮЩЕМ ВИДЕ:**

- 1) ВЫЯВЛЯЮТ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ХТП, И ПРОИЗВОДЯТ ИХ ВАРЬИРОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОДНОГО ИЛИ НЕСКОЛЬКИХ НАИБОЛЬШИХ ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ;**
- 2) ПРИНИМАЮТ РЕШЕНИЕ О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ИЛИ РАЗРАБОТКЕ НОВОЙ ХТС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СООТВЕТСТВУЮЩИХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ХТП;**
- 3) ПРОВОДЯТ РАСЧЕТ ДЛЯ НЕСКОЛЬКИХ ВАРИАНТОВ ХТС И СРАВНИВАЮТ ИХ НАТУРАЛЬНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ;**
- 4) ПО ЗНАЧЕНИЯМ НАТУРАЛЬНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИНИМАЮТ РЕШЕНИЕ О НЕОБХОДИМОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ТЕХ ИЛИ ИНЫХ ВАРИАНТОВ ХТС;**
- 5) ПРОВОДЯТ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ХТС И ВЫБИРАЮТ ИЗ НИХ НАИБОЛЕЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫЕ;**
- 6) СРАВНИВАЮТ ЭТИ ВАРИАНТЫ ХТС С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ;**
- 7) ПРИНИМАЮТ ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ О ВЫБОРЕ ХТС.**

**ДАННЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЯЕТ ОБЩИЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЛИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТО С ЦЕЛЬЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ХТП.**

Список литературы к главе 1

- 
- 
1. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. – М.: Химия, 1990. – 208 с.
  2. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии: Основы стратегии. – М.: Наука, 1976. – 500 с.
  3. Задорский В.М. Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода. – Киев: Техника, 1989. – 208 с.
  4. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях / А.А. Долинский, Б.И. Басок, С.И. Гулый и др. – Киев: ИТТФ НАНУ, 1996. – 206 с.

5. Белоглазов И.Н., Муравьев А.И. Интенсификация и повышение интенсивности химико-технологических процессов. – Л.: Химия, 1988. – 206 с.
6. Таганов И.Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса. Нелинейные системы. – Л.: Химия, 1979. – 208 с.
7. Адиутори Е.Ф. Новые методы в теплопередаче / Пер. с англ. под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Мир, 1977. – 230 с.
8. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1977. – 230 с.
9. Вейник А.В. Термодинамика реальных процессов. – Минск: Наука и техника, 1991. – 576 с.
10. Физические эффекты в машиностроении: Справочник / Под ред. В.А. Лукьянца. – М.: Машиностроение, 1993. – 224 с.
11. Федоткин И.М., Жарик Б.Н., Погоржельский Б.И. Интенсификация технологических процессов пищевых производств. – Киев: Техника, 1984. – 176 с.
12. Долинский А.А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий // Инженерно-физический журнал. – 1996. – Т. 69, № 6. – С. 855 – 896.
13. Долинский А.А., Накорчевский А.И. Принципы оптимизации массообменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т. 19, № 6. – С. 5 – 9.
14. Рогов И.А., Горбатов А.В. Физические методы обработки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 584 с.
15. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М.: Машиностроение, 2001. – 260 с.
16. Федоткин И.М., Липсман В.С. Интенсификация теплообмена в аппаратах пищевых производств. – М.: Пищ. промышленность, 1972. – 240 с.
17. Вибрационные массообменные аппараты / И.Я. Городецкий, А.А. Васин, В.М. Олевский, П.А. Лупанов; Под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1980. – 192 с.
18. Накорчевский А.И. Особенности и эффективность межфазного тепломассопереноса при пульсационной организации процесса // Инж.-физ. журнал. – 1998. – Т. 17, № 2. – С. 317 – 322.
19. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
20. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
21. Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах. – Киев: Вища шк., 1984. – 68 с.
22. Тепло- и массообмен в звуковом поле / В.Е. Накоряков, А.П. Бурданов, Н.М. Болдырев, П.Н. Терлеев. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1970. – 254 с.
23. Гинстлинг А.М., Барам А.А. Ультразвук в процессах химической технологии. – Л.: Госхимиздат, 1960. – 96 с.
24. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с англ. – М.: Иностран. лит., 1957. – 726 с.
25. Карпачева С.М., Рябчиков Б.Е. Пульсационная аппаратура в химической технологии. – М.: Химия, 1983. – 224 с.
26. Гершгал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.
27. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособие для вузов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
28. Бутков В.В., Вишняков В.В. Процессы и аппараты химической технологии с использованием электрических полей. – М.: НИИТЭХИМ, 1982. – 48 с.
29. Грановский М.Г., Лавров И.С., Смирнов О.В. Электрообработка жидкостей. – Л.: Химия, 1976. – 216 с.
30. Мирдель Г. Электрофизика. – М.: Мир, 1972. – 608 с.
31. Духин С.С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. – Киев: Наукова думка, 1975. – 246 с.

32. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.
33. Сокольский Ю.М. Ультразвуковые и магнитные поля в химической технологии. – Л.: ЛенНИИ-гипрохим, 1992. – 196 с.
34. Классен В.И. Омагничивание водных систем. – М.: Химия, 1982. – 296 с.
35. Применение метода магнитной обработки для интенсификации технологических процессов / Н.А. Розно, В.Г. Зерницкий, Я.И. Мисулович и др. – М.: НИИТЭХИМ, 1987. – Вып. 4. – 44 с.
36. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1995. – Ч. 1. – 400 с.
37. Бобков С.П. Некоторые теоретические аспекты механической активации физико-химических процессов // Изв. вузов. Химия и хим. технол. – 1992. – Т. 35, № 3. – С. 3 – 14.
38. Гольдин В.А., Чистов Е.Д. Установки и аппараты радиационной технологии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 185 с.
39. Брегер А.Х. Радиационно-химическая технология. Ее задачи и методы. – М.: Атомиздат, 1979. – 80 с.
40. Новиков В.С. Импульсные процессы переноса в гетерогенных системах: Обзор // Пром. теплотехника. – 1990. – Т. 12, № 2. – С. 23 – 39.
41. Немчин А.Ф. Новые технологические эффекты тепломассопереноса при использовании кавитации // Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 19, № 6. – С. 39 – 47.
42. Богданов В.В., Христофоров Б.И., Клоцунг Б.А. Эффективные малообъемные смесители. – Л.: Химия, 1989. – 224 с.
43. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
44. Химическая энциклопедия. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. – Т. 4. – 640 с.
45. Колебательные явления в многофазных средах и их использование в химической технологии // Р.Ф. Ганнев, Н.И. Кобаско, В.В. Кулин и др. – Киев: Техника, 1980. – 220 с.
46. Каневец Г.Е., Евдокимов В.Ю., Розенфельд А.И. Иерархия критериев эффективности химико-технологических, энерготехнологических и теплоэнергетических систем и их элементов // Хим. технология. – 1987. – № 5. – С. 5 – 13.
47. Сажин Б.С., Булеков А.П. Эксергетический метод в химической технологии. – М.: Химия, 1992. – 208 с.
48. Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартен М.Г. Общая химическая технология. – М.: Высш. шк., 1990. – 520 с.
49. Смирнов Н.Н., Курочкина М.И., Волжинский А.И. и др. Процессы и аппараты химических технологий (Основы инженерной химии). – СПб.: Химия, 1996. – 408 с.
50. Систер В.Г., Мартынов Ю.В. Принципы повышения эффективности тепломассообменных процессов. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 1998. – 508 с.

**51 СВЕТЛОВ Ю.В. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АППАРАТАХ С ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ПОТОКА. ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, МЕТОДЫ РАСЧЕТА. – М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 2003. – 304 С.**

## **2 ИМПУЛЬСНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ**

### **2.1 КАВИТАЦИЯ**

Под *кавитацией* в жидкости понимают образование заполненных паром и газом полостей или пузырьков при локальном понижении давления в жидкости до давления насыщенных паров. Соотношение содержания газа и пара в полости может быть различным (теоретически от нуля до единицы). В зависимости от концентрации пара или газа в полости их называют паровыми или газовыми [1 – 19].

Необходимо отметить, что понижение давления в жидкости до давления насыщенных паров возможно также при кипении или вакуумировании жидкости. Но эти процессы распространяются по всему

объему жидкости в отличие от кавитации, которая имеет ограниченную область. Различают *гидродинамическую кавитацию*, возникающую за счет местного понижения давления в потоке жидкости при обтекании твердого тела, и *акустическую кавитацию*, возникающую при прохождении через жидкость акустических колебаний. *Кавитационная каверна*, заполненная паром и газом в различных источниках, называется полостью, пузырьем, пузырьком, сферой и т.п. Будем употреблять эти термины в зависимости от рассматриваемой ситуации, так как они вполне применимы и адекватны физической сущности кавитации.

Акустическая кавитация представляет собой эффективное средство концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков [11]. Общая картина образования кавитационного пузырька представляется в следующем виде. В фазе разрежения акустической волны в 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 стены полости в нее диффундирует растворенный в жидкости газ, который затем подвергается сильному адиабатическому сжатию.

В момент схлопывания, давление и температура газа достигают значительных величин (по некоторым данным до 100 МПа и 1000 °С). После схлопывания полости в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве. В литературе употребляются такие термины, как захлопывание, схлопывание, аннигиляция, коллапс и т.п., которые обозначают одно явление – уменьшение радиуса пузырька  $R$  до минимального  $R_{\min}$  или уменьшение радиуса полости, ее деформацию и распад на несколько пузырьков.

Чтобы в жидкости образовалась полость, необходимо раздвинуть ее соседние молекулы на расстояние не менее удвоенной длины промежутка между ними. Жидкость может выдерживать максимальное растягивающее напряжение, рассчитываемое по формуле [12]

$$P \approx 2\sigma/R, \quad (2.1)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости;  $R$  – радиус пузырька.

Для воды при  $R = 2 \cdot 10^{-10}$  м,  $P = 1000$  МПа [16], кавитационная прочность необработанной воды не превышает нескольких десятков мегапаскалей. Существует нелинейная зависимость в виде предельных кривых Эше [11] между частотой акустической волны и пороговым давлением, при котором возникает кавитация. *Пороговым давлением* называется значение амплитуды акустического давления, вызывающего расширение зародыша до критического размера, после которого он начинает расти взрывообразно [11]. Чем ниже частота акустической волны, тем ниже пороговое давление. Например, для частоты 1 кГц пороговое давление не превышает  $10^5$  Па при нормальном статическом давлении и температуре ( $P_{\infty} \approx 0,1$  МПа,  $T \approx 20$  °С) [11, 13].

Расхождение между экспериментальной и теоретической прочностью объясняется наличием в реальных жидкостях различных примесей и включений, которые являются *зародышами кавитации* и сильно понижают ее прочность. Согласно теоретическим представлениям маленькие пузырьки должны растворяться в жидкости, а большие – всплывать. Тем не менее, в жидкости постоянно присутствуют пузырьки различного радиуса. Очень маленькие пузырьки стабилизируются на поверхностях и в трещинах малых твердых частиц, взвешенных в жидкости.

В любой жидкости зародыши кавитации могут образовываться за счет заряженных частиц высоких энергий, присутствующих в космических лучах [13]. Более 2/3 частиц, порожденных космическими лучами, составляют  $\mu$ -мезоны, а остальные – в основном электроны. Электроны хорошо поглощаются в жидкостях, а  $\mu$ -мезоны поглощаются слабо, но обладают большой проникающей способностью. Проходя через вещества, электроны и  $\mu$ -мезоны взаимодействуют с электронами атомов вещества и выбивают их, затрачивая на ионизацию определенную энергию. Вследствие локального выделения тепла, в которое переходит теряемая электронами энергия, в жидкости образуются паровые пузырьки. Если давление в жидкости больше давления насыщенных паров при данной температуре, то паровые пузырьки, порождаемые ионизирующими частицами высоких энергий, будут быстро исчезать. Кавитация на паровых зародышах развивается, либо когда давление в жидкости длительное время меньше давления насыщенных паров, либо за счет пульсации давления.

В жидкости, вследствие броуновского движения, имеют место флуктуации внутренней структуры – области пространства с молекулами низкой энергии и молекулами высокой энергии. В областях с молекулами высокой энергии, которые называют областями повышенной микро-температуры, звуковые волны могут обеспечить значения напряжений, достаточных для разрыва сплошности жидкости [14].

Стабильное существование парогазовых пузырьков объясняется тем, что на поверхности пузырька имеются равномерно распределенные одноименные заряды, обусловленные находящимися в жидкости ионами. Отталкивание этих зарядов предотвращает смыкание пузырька [11, 13].

Условие равновесия парогазового пузырька в жидкости записывается в виде

$$P_r = P_\infty - P_n - P_s + 2\sigma/R, \quad (2.2)$$

где  $P_s$  – давление, вызванное силами кулоновского отталкивания, Па;  $P_n$  – давление насыщенных паров, Па.

При распространении в жидкости гармонических колебаний без учета  $P_s$  и диффузии газа через поверхность пузырька, но с учетом изотермичности процесса роста пузырька с радиусом  $R$ , уравнение равновесия записывается как [18]

$$P_0 - P_a = \left( P_\infty - P_n + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R_0} + P_n, \quad (2.3)$$

где  $P_0$  – начальное давление в пузырьке, Па;  $P_a$  – акустическое давление, Па;  $R_0$  – начальный радиус пузырька, м;  $P_\infty$  – статическое давление в жидкости, Па.

Пузырек устойчив, пока  $P_a$  не достигает критического значения  $P_{кр}$ . При  $P_a > P_{кр}$  пузырек начинает быстро расти, что приводит к разрыву сплошности жидкости.

Значение критического радиуса определяется по формуле

$$R_{кр} = \sqrt{3} R_0 \sqrt{(R_0/2\sigma)(P_\infty - P_n + 2\sigma/R_0)}. \quad (2.4)$$

С учетом того, что давление насыщенных паров значительно меньше гидростатического давления, уравнение для кавитационной прочности жидкости в зависимости от начального радиуса пузырька записывается в виде

$$R_0^3 + R_0^2 2\sigma/P_\infty - 32\sigma^3/(27P(P_\infty - P_{кр})^2) \cong 0. \quad (2.5)$$

Для заданного переменного давления и частоты звукового поля существует минимальный и максимальный радиус пузырьков, способных вызвать кавитацию. Минимальный радиус определяется уравнениями (2.4) и (2.5), а максимальный соответствует резонансному радиусу, который определяется по формуле Миннерта [18]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left( P_\infty + \frac{2\sigma}{R_p} \right)}, \quad (2.6)$$

где  $\gamma = c_p/c_v$  – соотношение удельных теплоемкостей для газа и пара в пузырьке.

Формула (2.6) может быть использована для гармонических колебаний пузырька при небольших амплитудах, для низких частот звукового поля и крупных пузырьков. Для высоких частот более применима формула, выведенная Хабеевым при учете фазовых переходов и поверхностного натяжения, которая описывает зависимость резонансного радиуса пузырька от частоты [17]:

$$R_p^4 = \sigma^2 / (\pi A_p^2 f^2), \quad (2.7)$$

где  $A_p$  – функция, зависящая от теплоты парообразования, плотности, теплопроводности и температуры жидкости. По мере увеличения частоты акустического поля, кавитацию вызывают только пузырьки с большей  $f_p$ , т.е. пузырьки меньшего радиуса, чем  $R_p$ .



Порог кавитации и его частотная зависимость определяются объемом жидкости. Величина кавитационной прочности жидкости зависит от наибольшего зародыша из всех имеющихся в объеме жидкости. Вероятность попадания в озвучиваемую зону зародыша большего размера возрастает с увеличением объема озвучиваемой жидкости [15].

Нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее простую модель сферически-симметричной пульсации газовой полости радиусом  $r = R(t)$  в поле плоской звуковой волны, имеет вид:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} [P_\infty - P(R)] = 0. \quad (2.8)$$

Аналитическое решение этого уравнения, получено Рэлеем при простейших условиях:  $P_\infty = P_a$ ;  $P(R) = 0$ . В этом случае уравнение (2.8) переходит в уравнение захлопывания пустой полости под действием гидростатического давления:

$$\left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{2}{3} \frac{P_\infty}{\rho} \left( \frac{R_{\max}^3}{R^3} - 1 \right). \quad (2.9)$$

Время захлопывания пустой полости определяется из формулы Рэлея [18]:

$$t_c = 0,915 R_{\max} \sqrt{\rho / P_\infty}. \quad (2.10)$$

Уравнение, описывающее изменения радиуса кавитационной полости в поле ультразвуковой волны известно как уравнение Нолтинга-Неппайреса:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[ P_\infty - P_n - P_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} - \left( P_\infty + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0. \quad (2.11)$$

Уравнение (2.11) достаточно хорошо описывает поведение кавитационного пузырька в поле ультразвуковой волны, но допущения о несжимаемости жидкости не позволяют правильно оценить конечную стадию захлопывания кавитационного пузырька.

Динамику кавитационного пузырька с учетом сжимаемости описывает уравнение Херринга-Флинна (2.12). Уравнение (2.12) более точно описывает динамику кавитационного пузырька с учетом сжимаемости, но неадекватно при скоростях движения, сравнимых со скоростью звука  $c_0$ , что характерно для конечной стадии захлопывания пузырька.

$$\begin{aligned} & R \left( 1 - 2 \frac{dR}{c_0 dt} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{4}{3} \frac{dR}{c_0 dt} \right) \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \\ & + \frac{1}{\rho} \left[ P_\infty - P_n - P_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} - \left( P_\infty + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \\ & + \frac{R}{\rho} \frac{dR}{c_0 dt} \left( 1 - \frac{dR}{c_0 dt} \right) \frac{dP(R)}{dR} = 0. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Этот недостаток устранен в уравнении Кирвуда-Бете, выведенного с допущением о сферичности волн конечной амплитуды, образующихся при захлопывании полости:

$$R \left( 1 - \frac{dR}{c_0} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{dR}{3c_0} \right) \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \left( 1 + \frac{dR}{c_0} \right) H - \frac{dR}{c_0} \left( 1 - \frac{dR}{c_0} \right) R \frac{dH}{dR} = 0, \quad (2.13)$$

где

$$H = \int_{P_\infty}^{P(R)} \frac{dP}{\rho} = \frac{n}{n-1} \frac{A^{1/n}}{\rho} \left\{ \left[ \left( P_\infty + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3-\gamma} - \frac{2\sigma}{R} + B \right]^{\frac{n-1}{n}} - \left[ \left( P_\infty - P_a \sin \omega t + B \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \right\};$$

$c = [c_0^2 + (n-1)H]^{0.5}$ ;  $A$ ,  $B$ ,  $n$  – постоянные коэффициенты, для воды  $A = 300$  МПа,  $B = 300$  МПа,  $n = 7$ .

Уравнения (2.11), (2.12) и (2.13) не решаются в общем виде. Их численные решения получают для конкретных частных случаев с определенными значениями частоты и амплитуды звукового поля и величиной начального размера пузырька. Исследование этих уравнений сделано подробно в [11, 15, 16] и показывает, что при амплитудах звукового давления  $P_a < P_{кр}$  газовые пузырьки не захлопываются и пульсируют линейно. Пузырьки с  $R < R_p$  пульсируют с частотой акустической волны, а при размере пузырька  $R > R_p$  период пульсации близок к периоду собственных колебаний. При  $P_a > P_{кр}$  движение полости становится неустойчивым и она захлопывается в первом положительном полупериоде. При дальнейшем увеличении  $P_a$  инерционные силы препятствуют захлопыванию пузырька, и он совершает одно или несколько колебаний, а затем схлопывается. Все эти результаты достаточно хорошо согласовываются с экспериментом [13, 15, 16].

В первоначальный момент времени рост пузырьков происходит за счет понижения давления в жидкости до порогового  $P_{кр}$ , которое меньше давления насыщенных паров. Но в поле периодических колебаний происходит увеличение во времени среднего радиуса пузырька и средней массы газа в пузырьке. Качественное объяснение этого явления впервые было сделано Блейком. При периодических пульсациях давления изменяется радиус пузырька и концентрация газа в нем. В фазе сжатия из пузырька в жидкость газ выходит, а в фазе расширения приходит в пузырек за счет диффузии. Так как количество продиффундирующего газа пропорционально площади поверхности, то при нелинейных пульсациях газовых пузырьков поток газа в пузырек при его расширении превышает поток газа из пузырька при его сжатии. За каждый цикл пульсации возникает приращение массы газа в пузырьке, что приводит к среднему во времени росту радиуса газового пузырька. Происходит как бы «выпрямление» знакопеременного диффузионного потока газа через поверхность пульсирующего газового пузырька [17]. Это явление было названо выпрямленной газовой диффузией.

Рост паровых пузырьков при периодических пульсациях, возбуждаемых внешним полем, также обусловлен явлением, которое получило название выпрямленной теплопередачи или выпрямленного теплопереноса [17]. Этот эффект аналогичен выпрямленной газовой диффузии. В фазе разрежения акустического поля при понижении давления понижается температура пузырька и тепло идет от жидкости в пузырек через большую площадь поверхности пузырька, а в фазе сжатия при повышении давления повышается температура пузырька и тепло уходит из пузырька в жидкость и при этом площадь поверхности пузырька мала. В среднем за цикл проявляется нелинейный эффект направленного от жидкости к пузырьку потока тепла. Кроме того, паровой пузырек при пульсациях поглощает энергию внешнего поля, которая затрачивается на испарение жидкости и приводит к дополнительному росту пузырька [13].

В обычных условиях не наблюдается чистых газовых или паровых пузырьков и пузырек, как правило, заполнен парогазовой смесью. Рост пузырька во внешнем акустическом поле происходит за счет всех эффектов, которые были описаны выше.

Росту парогазового пузырька препятствуют присоединенная масса жидкости, статическое давление и давление поверхностного натяжения. Рост или исчезновение кавитационного пузырька происходит при преобладании тех или иных эффектов. Нелинейность кривой фазового равновесия

приводит к тому, что в среднем температура парового пузырька понижается по отношению к температуре окружающей жидкости, а это вызывает поток тепла из жидкости в пузырек, испарение жидкости и рост пузырька в среднем за период.

В предположении, что парогазовая смесь в реальном кавитационном пузырьке при адиабатическом сжатии ведет себя как идеальный газ, давление в пузырьке в момент захлопывания определяется параметром газосодержания  $\alpha$  [18]:

$$P_{\max} \cong P_{\infty} / (81\alpha^3). \quad (2.14)$$

При расширении кавитационного пузырька в жидкость излучается сферическая волна. Без учета вязкости и теплопроводности давление в волне определяется по формуле Джилмора:

$$P(r, t) = \frac{R}{r} (P(R) - P_{\infty}) + \frac{R}{r} \left(1 - \frac{R^3}{r^3}\right) \frac{1}{2} \rho \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + \frac{r}{c_0} \frac{dR}{dt} \left(1 - \frac{R}{r}\right) \left[ \rho \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - 2(P(R) - P_{\infty}) - R \frac{dP(R)}{dR} \right]. \quad (2.15)$$

При очень большой скорости захлопывания пузырька излучаемая волна может перейти в ударную, давление в которой изменяется обратно пропорционально расстоянию от полости  $r$  [18]. Расстояние, на котором образуется ударная волна, определяется значением максимального давления в полости и соответствует соотношению:

$$P_{\max} > 13,6 \left( \lg \frac{r}{R_{\min}} \right)^{-2/3}, \quad (2.16)$$

где  $P_{\max}$  составляет сотни мегапаскалей.

Динамика парогазовой полости с учетом теплообмена и частично – динамики газа в пузырьке рассматривалась в работах М.А. Маргулиса [14, 19]. Для описания движения стенки пузырька использовалось дифференциальное уравнение (2.8). Скорость газа  $V_r(R, t)$  в пузырьке определялась из уравнения неразрывности. Масса газа  $m(R, t)$  в пузырьке радиусом  $R$  считалась неизменной.

Давление в пузырьке равно

$$P(t) = \frac{R_0^3 P_{\infty}}{3T_0} \left( \int_0^{R_0} \frac{R_i^2}{T(R_i, t)} dR_i \right)^{-1}, \quad (2.17)$$

где  $0 \leq R_i < R_0$ .

Уравнение теплопроводности для газа внутри кавитационного пузырька имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_r c_{п}} \operatorname{div}(\lambda_r \operatorname{grad} T) - \bar{V}_r \operatorname{grad} T + \frac{1}{\rho_r c_{п}} \frac{dP}{dt}, \quad (2.18)$$

где  $\rho_r c_{п} = \frac{P(t)}{T(R_i, t)} \frac{\gamma}{\gamma - 1}$ .

По результатам численных решений этих уравнений был сделан вывод, что теплообмен в процессе схлопывания пузырька оказывается весьма существенным, значительно понижающим максимальные параметры парогазовой смеси внутри кавитационного пузырька: скорость и температуру – более чем в 2 раза, а давление – более чем на порядок по сравнению с адиабатическим схлопыванием. Время схлопывания в адиабатическом режиме и с учетом теплообмена незначительно отличается от рэлеевского времени для пустого пузырька.

Минимальный радиус пузырька  $R_{\min}$  и радиус  $R_c$ , при котором достигается максимальная скорость при учете теплообмена, почти вдвое превышают соответствующие величины для адиабатического схлопывания. Максимальная скорость движения стенок пузырька при учете теплообмена (не более 600 м/с) значительно меньше скорости звука в жидкости ( $c_0 \approx 1500$  м/с), поэтому вклад слагаемых, содер-

жащих  $dR/dt_{c_0}$  в уравнениях Херринга-Флинна и Кирквуда-Бете, должен быть значительно меньше, чем для модели адиабатического схлопывания [19]. Эти выводы подтверждаются экспериментальными исследованиями [20, 21], согласно которым конечный радиус кавитационного пузырька всего в 3 – 5 раз меньше исходного.

В большинстве исследований кавитации, особенно теоретических, рассматривают поведение единичного пузырька. В реальных условиях необходим целый комплекс мер, чтобы добиться существования одиночного пузырька. Даже при давлении, не намного превышающем порог кавитации, сразу появляется множество кавитационных пузырьков, занимающих определенную часть пространства, которую называют кавитационной областью [22]. При импульсных растягивающих напряжениях в жидкости зародыши кавитации начинают расти, образуя *кавитационный кластер*, форма и длина которого определяются начальным спектром размеров кавитационных зародышей, характером прикладываемого напряжения и граничными условиями. Все зародыши достигают максимального размера одновременно, и среда может считаться практически монодисперсной, содержащей пузырьки только одного размера [23].

При малых расстояниях между пузырьками в плотном кавитационном кластере кавитационные пузырьки взаимодействуют друг с другом в процессе пульсаций. В этом случае в уравнение (2.11) необходимо ввести слагаемое, выражающее давление, генерируемое соседними пузырьками. Запишем уравнение (2.11), учитывая давление, генерируемое всеми кавитационными пузырьками  $P_{\text{кав}}$ :

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[ P_{\infty} - P_{\text{п}} - P_{\text{а}} + P_{\text{кав}} + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} - \left( P_{\infty} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0. \quad (2.19)$$

Рассмотрим отдельную область кавитационных пузырьков, равномерно распределенных в пространстве с постоянной плотностью  $\rho_{\text{п}}$  [27]. Каждое схлопывание пузырька производит волну давления и делает свой вклад во вторичное давление  $P_{\text{кав}}$  в уравнении (2.19). Точное решение уравнения (2.19) требует решения отдельного уравнения для каждого кавитационного пузырька.

ПРОИЗВЕДЕМ НЕКОТОРЫЕ УПРОЩЕНИЯ. ПРИМЕМ, ЧТО ВСЕ ПУЗЫРЬКИ ИМЕЮТ ОДИНАКОВЫЙ РАЗМЕР И ВНЕШНИЕ УСЛОВИЯ ОДИНАКОВЫ ДЛЯ ВСЕХ ПУЗЫРЬКОВ. СЛЕДОВАТЕЛЬНО, КАЖДЫЙ ИЗ ПУЗЫРЬКОВ КАВИТАЦИОННОГО КЛАСТЕРА СХЛОПЫВАЕТСЯ В МОМЕНТ ВРЕМЕНИ  $T_c$  И ИЗЛУЧАЕТ ВОЛНУ ДАВЛЕНИЯ  $P_{\text{КАВ1}}$ , ОДИНАКОВУЮ ДЛЯ ВСЕХ ПУЗЫРЬКОВ. ОБЩЕЕ ВТОРИЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ  $P_{\text{КАВ}}$  НАХОДИТСЯ КАК СУПЕРПОЗИЦИЯ ВСЕХ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ, ВЗЯТЫХ В КОЛИЧЕСТВЕ, ОГРАНИЧЕННОМ ВРЕМЕНЕМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ. ВЫДЕЛИМ В КАВИТАЦИОННОМ КЛАСТЕРЕ СФЕРУ РАДИУСОМ  $R$ , ВКЛЮЧАЮЩУЮ МНОЖЕСТВО КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ. В ЦЕНТРЕ СФЕРЫ НАХОДИТСЯ РАССМАТРИВАЕМЫЙ ПУЗЫРЕК. В ПРЕДЕЛАХ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА ВКЛАД ВСЕХ ПУЗЫРЬКОВ БУДЕТ СОСТАВЛЯТЬ  $\rho_{\text{п}} P_{\text{п}}(t - t_c - r/c) R_{\text{мин}} \frac{dv}{r}$ , ПРИ  $dv = 4\pi r^2 dr$ . ИНТЕГРИРУЯ ПО ВСЕМУ ОБЪЕМУ, ПОЛУЧАЕМ:

$$P_{\text{кав}}(t) = \rho_{\text{п}} R_{\text{мин}} \iiint P_{\text{п}}(t - t_c - r/c) \frac{dv}{r} \quad \text{ИЛИ} \\ P_{\text{кав}}(t) = 4\pi \rho_{\text{п}} R_{\text{мин}} c^2 \int_{-\infty}^{t-t_c} P_{\text{п}}(\tau)(t - t_c - \tau) d\tau, \quad (2.20)$$

ГДЕ  $\tau = t - t_c - \frac{r}{c}$ .

ПРИ  $\tau = 0$ ,  $T > T_c$  УРАВНЕНИЕ (2.20) ПРИНИМАЕТ ВИД:

$$P_{\text{кав}}(t) = 4\pi c^2 \rho_{\text{п}} R_{\text{мин}} (t - t_c) \int_{-\infty}^{t-t_c} P_{\text{п}}(\tau) d\tau = 4\pi \rho_{\text{п}} c^2 B R_0^2 (t - t_c) \sqrt{2\rho P_{\text{макс}}}. \quad (2.21)$$

ЗДЕСЬ  $R_{\text{МИН}}$  – МИНИМАЛЬНЫЙ РАДИУС ПУЗЫРЬКА ПРИ СХЛОПЫВАНИИ, М;  $C$  – СКОРОСТЬ ЗВУКА В ЖИДКОСТИ, М/С;  $P_{\text{МАКС}}$  – ДАВЛЕНИЕ ГАЗА В ПУЗЫРЬКЕ ПРИ СХЛО-

ПЫВАНИИ, ПА;  $\rho_{п}$  – ПЛОТНОСТЬ ПУЗЫРЬКОВ,  $M^{-3}$ . ЧИСЛЕННАЯ КОНСТАНТА  $B = \Gamma(1/2)\Gamma(3k - 1/2) / \Gamma(3k)$ . ДЛЯ АДИАБАТИЧЕСКОЙ ЭКСПОНЕНТЫ  $K = 1,4$  (ВОЗДУХ) ЭТА ВЕЛИЧИНА РАВНА  $B = 0,953$ ;  $\Gamma$  – ГАММА-ФУНКЦИЯ. ДЛЯ  $T < T_c$  ВТОРИЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ РАВНО НУЛЮ.

В развитой кавитационной области количество кавитационных пузырьков превышает количество зародышей примерно в  $10^5$  раз. Это объясняется тем, что процесс возникновения кавитационных пузырьков является цепной реакцией [13]. Кавитация, возникшая на единичном зародыше, за время в несколько десятков периодов ультразвуковых колебаний развивается в стабильную область, состоящую из множества кавитационных пузырьков.

Процесс развития кавитационной области представляется следующим образом. При захлопывании кавитационный пузырек может терять устойчивость и распадаться на части, а так как давление и температура в этот момент в пузырьке максимальны, то давление и температура парогазовой смеси в образовавшихся «осколках» тоже повышены. В фазе растяжения они легко расширяются и становятся новыми зародышами кавитации, менее прочными, чем постоянно имеющиеся в жидкости. Кавитационные полости, возникшие на этих зародышах, порождают новые. Внутри кавитационной области идет непрерывный процесс размножения и коагуляции кавитационных пузырьков, причем кавитационный порог несколько уменьшается, так как в установившемся режиме роль кавитационных зародышей начинают выполнять равновесные пузырьки, объем и газосодержание у которых больше, чем у зародышей [22].

В качестве величины, характеризующей степень развитости кавитации, Л.Д. Розенберг предложил использовать *индекс кавитации*

$$K = \Delta v / v, \quad (2.22)$$

где  $v$  – выделенный объем;  $\Delta v$  – объем всех кавитационных пузырьков.

Выделенный объем  $v$  должен удовлетворять следующим двум требованиям:

1) линейные размеры этого объема должны быть малы по сравнению с длиной волны, чтобы первичное возбуждающее кавитацию звуковое давление можно было считать внутри этого объема постоянным по величине и синфазным;

2) линейные размеры этого объема должны быть намного больше размеров кавитационного пузырька [22].

Индекс кавитации есть мера пространственной плотности энергии, а величина  $\Delta v$  пропорциональна потенциальной энергии, запасенной всеми содержащимися в объеме  $v$  пузырьками. Работа, совершаемая  $n$  пузырьками с одинаковыми максимальными размерами, записывается в виде

$$A_k \approx \frac{4}{3} \pi R_{\max}^3 P_{\infty} n = P_{\infty} \Delta v. \quad (2.23)$$

В установившемся режиме, при неизменных внешних условиях (статическое давление, температура, газосодержание и т.п.) индекс кавитации есть функция координат поля. Рассматривая  $K$  в предельном случае как функцию точки, можно ввести понятие среднего (по объему кавитационной области) индекса кавитации  $\langle K \rangle$  в виде

$$\langle K \rangle = \frac{1}{v} \int_v K dv. \quad (2.24)$$

Величина  $K$  лежит в пределах  $0 < K < 1$ . Нижний предел соответствует отсутствию кавитации, верхний предел достижим только в локальном объеме. Усреднять индекс кавитации можно не только по области, но и по какому-либо сечению.

С индексом кавитации связана также свободная энтальпия  $H$  кавитационных пузырьков [22]. Приращение свободной энтальпии равно:

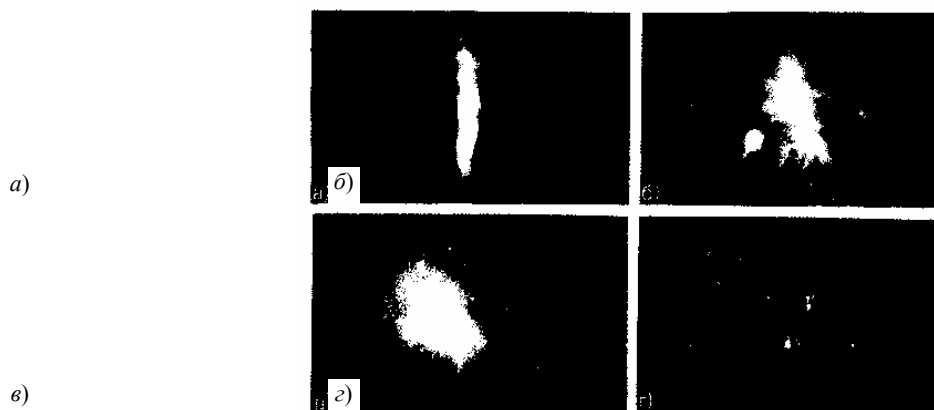
$$\Delta H = -H\Delta T + V\Delta P + \mu\Delta p, \quad (2.25)$$

где  $H$  и  $V$  – энтальпия и объем подсистемы;  $\Delta T$  и  $\Delta P$  – приращения температуры и давления;  $\mu$  – химический потенциал пара в единице объема;  $\Delta p$  – относительное изменение давления. В процессе расширения кавитационного пузырька можно считать, что  $\Delta T = \Delta P = 0$ . Тогда свободная энтальпия всех кавитационных полостей в единичном объеме выразится как

$$H = \mu \int_{I_n}^I V_i \frac{dN(I)}{dI} dI = \mu K, \quad (2.26)$$

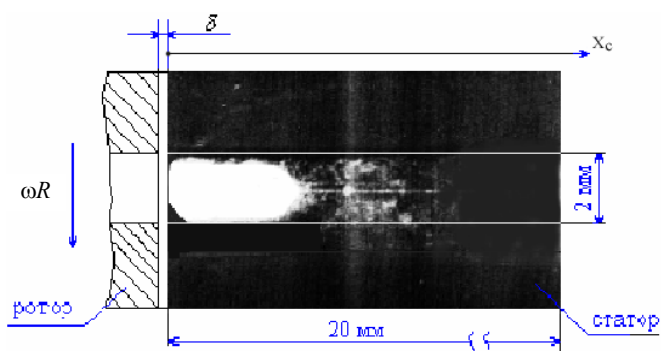
**т.е. является линейной функцией кавитации.**

В настоящее время нет удовлетворительной модели кавитационной области, адекватно описывающей ее поведение и поведение принадлежащего к ней отдельного кавитационного пузырька. Поведение кавитационной области зависит от многих явлений и факторов: размножение и коагуляция (коалесценция) пузырьков; их взаимодействие; изменение характера пульсаций пузырька за счет ударных волн и звукового излучения соседних пузырьков; изменение средних акустических свойств среды; микропотоки внутри кавитационной области и на границе пузырька; распределение зародышей кавитации; газосодержание и т.д. На рис. 2.1 и 2.2 показаны кавитационные области, образованные в ультразвуковом излучателе и в роторном импульсно-кавитационном аппарате.



**РИС. 2.1 КАВИТАЦИОННАЯ ОБЛАСТЬ, ОБРАЗОВАННАЯ НАД УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ [18]:**

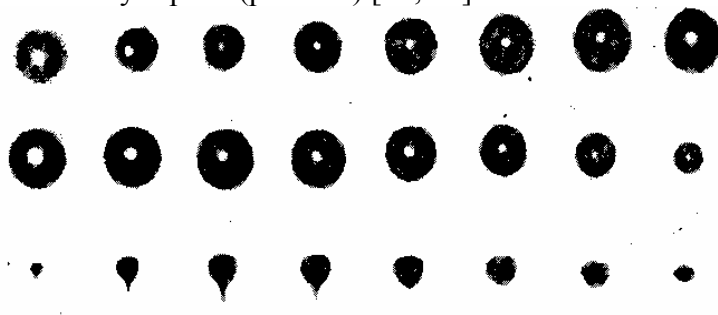
**А – 0,9 МПА; Б – 0,6 МПА; В – 0,2 МПА; Г – 0,1 МПА**



**РИС. 2.2 КАВИТАЦИОННЫЙ КЛАСТЕР, ОБРАЗОВАННЫЙ В КАНАЛЕ СТАТОРА РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНО-КАВИТАЦИОННОГО АППАРАТА.**

В процессе своего жизненного цикла кавитационные пузырьки теряют сферическую форму в большей или меньшей степени в зависимости от максимального радиуса, частоты акустического поля, вязкости, наличия поверхностно-активных веществ и т.п. Наибольшие деформации наблюдаются на за-

ключительной стадии сжатия. Особенно большое влияние имеет соседство твердой стенки или близко-расположенного кавитационного пузырька (рис. 2.3) [14, 20].



**Рис. 2.3** Кинограмма пульсаций кавитационного пузырька и образования кумулятивной струи по направлению к твердой поверхности (максимальный радиус пузырька 1,1 мм) [14]

Различают четыре типа сжатия, потери устойчивости и схлопывания пузырьков в ультразвуковом поле вблизи твердой поверхности. При первом типе схлопывания кумулятивные струи не наблюдаются. При втором и третьем типах схлопывания динамический импульс образуется как результат действия волн давления, распространяющихся от прилегающей к поверхности части пузырька, так и действия кумулятивной струи, образующейся при слиянии двух кольцевых струй. При четвертом типе схлопывания динамическое воздействие на твердую стенку оказывает волна давления, распространяющаяся от пузырька, отделенного от поверхности кольцевыми струями. При слиянии этих струй часто возникает кумулятивная струя от твердой поверхности сквозь кавитационный пузырек, что приводит к снижению динамического импульса. С увеличением вязкости жидкости кумулятивные струйки ослабевают.

Помимо кольцевых и радиальных кумулятивных струй кавитационные пузырьки образуют ряд мелких нитеобразных «отростков» и «шероховатостей», длина которых увеличивается по мере сжатия пузырьков (рис. 2.4) [14, 19].

Для создания кавитационной области используется определенная часть энергии первичного звукового поля. Отношение затраченной энергии к полной энергии первичного поля называется *коэффициентом кавитационного использования акустической энергии* [19]:

$$\eta = \frac{E_k}{E}. \quad (2.27)$$

Энергия звукового поля, идущая на образование кавитационной области, затрачивается в течение всей фазы расширения кавитационного пузырька. Это время несколько меньше периода первичного звука  $T_0$ . Приняв это время равным  $T_0$ , средняя за период мощность, которая затрачивается на образование всей кавитационной области, равна:



$$N_k = \frac{E_k}{T_0} = \eta \frac{E}{T_0} = N\eta, \quad (2.28)$$

где  $N$  – мощность первичного звука, Вт.

Таким образом, кавитационная область представляет собой своеобразный трансформатор мощности, в котором сравнительно медленно накапливаемая энергия освобождается в течение очень короткого

времени, в результате чего мгновенная мощность во много раз превосходит среднюю, вводимую излучателем в кавитационную область [23].

На развитие и интенсивность кавитации большое влияние оказывают внешние условия и свойства жидкости. При кавитации в дегазированной жидкости в кавитационные пузырьки поступает меньшее количества воздуха, чем в отстоявшейся, что приводит к уменьшению демпфирующего эффекта парогазовой смеси в пузырьке при его смыкании и возрастании давления в ударной волне. Дегазация жидкости приводит к уменьшению области кавитации с одновременным увеличением интенсивности ударной волны, создаваемой кавитационными пузырьками [13]. При повышении температуры давление внутри пузырька, определенное давлением пара и газа, увеличивается, и ударная волна ослабляется, но это также приводит к росту кавитационной области.

Из теоретических предпосылок следует, что увеличение гидростатического давления приводит к уменьшению времени захлопывания пузырька и увеличению интенсивности ударных волн. Эксперименты, проведенные по исследованию кавитационной эрозии, сонолюминесценции и измерению амплитуды давления в момент захлопывания кавитационного пузырька, показывают, что увеличение гидростатического давления приводит к заметному увеличению этих явлений, а затем некоторому уменьшению с выраженным оптимумом. Все эти зависимости получили многочисленное экспериментальное подтверждение в различных исследованиях [13].

Акустическая кавитация в жидкостях инициирует различные физико-химические явления; *сонолюминесценцию* (свечение жидкостей); *химические эффекты* (звукохимические реакции); *эрозию* твердого тела (разрушение поверхности); *диспергирование* (измельчение твердых частиц в жидкости) и *эмульгирование* (смешивание и гомогенизация несмешивающихся жидкостей).

Сонолюминесценция и звуковые химические реакции являются генетически связанными процессами, могут оказывать взаимное влияние, но в принципе они могут осуществляться независимо один от другого [14, 19]. Ультразвуковая люминесценция и свечение, возникающее 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 кавитацией [14, 19].

Модель физико-химических процессов, происходящих в кавитационном пузырьке и прилегающем к нему объеме жидкости, представляют в следующем виде [14]. 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:

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



**Рис. 2.4** Образование «шероховатостей» на поверхности кавитационного пузырька с кумулятивной струйкой [14]



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, а также в процессе перезарядки. Здесь символом  $\rightarrow$  обозначено химическое действие звука.

При схлопывании кавитационного пузырька в раствор переходят радикалы  $H^\circ$ ,  $OH^\circ$ , ионы и электроны малой энергии, образовавшиеся в газовой фазе при расщеплении молекулы  $H_2O$  и веществ с высокой упругостью пара, продукты их взаимодействия и частичных рекомбинаций, а также метастабильные возбужденные молекулы  $H_2O$ .

Суммарную схему кавитационного расщепления молекул воды представляют в следующем виде:



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 –  $O_2$  и  $H_2$ .

В конечном счете, воздействие кавитации на водные растворы сводится к единственному процессу – расщеплению 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.

Исследования сонолюминесценции, звукохимических реакций и выдвигаемые многочисленными гипотезы, объясняющие эти явления, на данный момент позволяют сделать только один вывод: природа первичной активации молекул внутри кавитационного пузырька является либо тепловой, либо электрической. Более подробно с этими явлениями можно ознакомиться в [14, 19, 21].

Эрозия твердого тела (разрушение поверхности), очистка поверхностей, удаление заусенцев и микронеровностей, диспергирование твердых частиц и эмульгирование осуществляются, в основном, двумя характерными проявлениями кавитации: ударными волнами и кумулятивными струйками, образующимися при схлопывании кавитационных пузырьков.

На поверхностях частиц и твердых тел имеются концентраторы напряжений в виде микротрещин, неровностей поверхности и т.п., на которых образуются зародыши кавитации. Под действием звукокапиллярного эффекта и интенсивных микропотоков жидкость проникает в поры и трещины, где при захлопывании кавитационных пузырьков возникает мощная ударная волна, способствующая разрушению материалов. Кумулятивные струйки разрушают поверхность твердого тела за счет кинетической энергии жидкости. Мелкие частицы твердого тела, размеры которых соизмеримы с поперечным сечением кумулятивных струй, увлекаются ими и дают дополнительный вклад в процесс разрушения твердых частиц, находящихся в жидкости. Более подробно ознакомиться с кинетикой диспергирования, очистки, эрозии и эмульгирования в поле акустической кавитации можно в [10, 11, 16, 13 – 25].

Методы исследования кавитации можно разделить на прямые и косвенные. К прямым методам относятся:

1) визуальные – фото-, кино- и видеосъемка кавитационных образований;

2) акустические – измерение давления в ударной волне, излучаемой одним или совокупностью кавитационных пузырьков при пульсациях и схлопывании.

Косвенные методы включают в себя такие методы как:

1) фотоэлектрический – регистрация сонолюминесценции при кавитации;

2) химические – исследование изменения массы, концентрации или объема химических реагентов за счет звукохимических реакций в кавитационном поле;

3) гидродинамические – изменение гидродинамических параметров потока жидкости, связанных с интенсивностью кавитации;

4) механические – измерение величины кавитационной эрозии, которую обычно выражают через убыль веса образцов в виде алюминиевых цилиндров или через площадь вырывов в алюминиевой фольге;

5) технологические – изменения качественных показателей обрабатываемой среды, связанных с интенсивностью кавитации (в качестве обрабатываемой среды используют эмульсии, суспензии и т.п., в которых протекают гидромеханические и тепломассообменные процессы).

В качестве безразмерных параметров, характеризующих кавитацию, используют:

– индекс кавитации  $K$ ;

– критерии гидродинамической и акустической кавитации [26, 27]:

$$x_r = \frac{P_k - P_n + 2\sigma/R_0}{\rho V^2 / 2}; \quad (2.29)$$

$$x_a = \frac{P_k - P_n + 2\sigma/R_0}{P_a}, \quad (2.30)$$

где  $V$  – скорость потока жидкости.

Используются также *комбинированный и эффективный критерии кавитации*:

$$x_k = \frac{P_k - P_n + 2\sigma/R_0}{\rho V^2 / 2 + P_a}; \quad (2.31)$$

$$x_3 = \frac{x_a x_r}{x_a + x_r}. \quad (2.32)$$

В некоторых случаях, вследствие малости  $P_n$  и  $2\sigma/R_0$ , этими членами пренебрегают. Критерии  $x_a$  и  $x_r$  имеют разные коэффициенты корреляции с интенсивностью кавитации, характеризуемой амплитудой импульса давления, излучаемого кавитационным пузырьком [26, 27].

Индекс кавитации  $K$  существенно зависит от величины выделенного расчетного объема  $v$ . Критерии кавитации  $x$  и индекс кавитации  $K$  отражают различные количественно-качественные параметры кавитации. Критерии кавитации  $x$  характеризуют гидродинамическую и акустическую обстановку. В многочисленных исследованиях установлено, что максимум величины ударного давления, генерируемого кавитационным пузырьком, наблюдается при  $0,2 \leq x_a \leq 0,3$ . Индекс кавитации  $K$  характеризует распространение кавитационных пузырьков в технологическом объеме и является мерой пространственной плотности энергии.

Для более полного представления о физической картине кавитации следует характеризовать ее величиной ударного давления ( $P_{k1}$ ) и по величине объема кавитационных образований ( $\Delta v$ ). Относительные параметры типа  $\left(\frac{P_{k1}}{P_a}\right)$  и  $K$  также необходимы, так как они характеризуют эффективность излучателя.

Наиболее перспективным является комбинированный способ исследования кавитации – фото- и видеосъемка, совмещенные с измерением акустических и гидродинамических параметров кавитационного поля. Этот способ хорошо зарекомендовал себя во многих исследованиях кавитации [27].

## 2.2 АВТОКОЛЕБАНИЯ И РЕЗОНАНС

Одним из факторов воздействия на обрабатываемую среду служат акустические эффекты, обусловленные пульсациями давления и скорости потока жидкости или газа. Для повышения эффективности работы машин и аппаратов с импульсным энергетическим воздействием (МАИЭВ) используются *дополнительные источники акустических колебаний и вибраций*. Дополнительные источники акустических колебаний и вибраций можно разделить на *активные*, которые требуют ав-

тономного источника энергии для генерирования колебаний, и *пассивные*, которые приводятся в колебательное движение за счет энергии обрабатываемой среды.

Технологические системы, включающие в себя МАИЭВ, содержат также технологическое оборудование и трубопроводы, связывающие систему в единый комплекс. С точки зрения акустики, это оборудование и трубопровод имеют свои собственные резонансные частоты и могут содержать дополнительные источники акустических колебаний. В МАИЭВ, как генераторах энергетических (акустических) импульсов, акустические поля вспомогательного технологического оборудования в совокупности формируют сложную картину и тем самым оказывают определенное влияние на интенсивность проводимых процессов. Это влияние может дать как положительный, так и отрицательный эффект и его необходимо учитывать. Синхронизация собственных акустических эффектов технологического оборудования и дополнительных источников акустических колебаний с основными генераторами гидроакустических импульсов – МАИЭВ, будет благоприятно сказываться на интенсификации химико-технологических процессов. В этом случае, могут иметь место автоколебательные и резонансные режимы работы МАИЭВ и технологической системы, КПД при таких режимах значительно выше.

Колебания давления и скорости, наложенные на осредненное течение, могут служить причиной возмущающего воздействия на устойчивость и структуру течения. В случае ламинарного течения эти воздействия могут ускорить или замедлить переход к турбулентному режиму течения, а в случае турбулентного потока – существенно изменить гидродинамические характеристики потока, в частности спектр турбулентности, и даже привести к образованию вихревых течений [28, 29].

Экспериментальные работы по исследованию влияния колебаний на гидродинамику турбулентных потоков в каналах показали, что при наличии наложенных регулярных колебаний скорости взаимодействие турбулентных пульсаций с наложенными регулярными колебаниями возможно в том случае, когда частота наложенных регулярных колебаний скорости совпадает с частотой турбулентных пульсаций, соответствующей малым волновым числам.

В случае высокочастотных колебаний, когда период регулярных возмущений совпадает с минимальным периодом турбулентных пульсаций, картина течения существенно усложняется: регулярные колебания могут взаимодействовать с турбулентными пульсациями, в результате чего спектр турбулентных колебаний может измениться. В спектре одновременно будут существовать как случайные турбулентные колебания, так и регулярные.

В турбулентном потоке возникают когерентные структуры – крупномасштабные периодические вихревые образования, развивающиеся и взаимодействующие друг с другом. Когерентные структуры чувствительны к различного рода периодическим возмущениям, управление ими может привести как к интенсификации, так и к замедлению ХТП.

Таким образом, установлено, что взаимодействие акустического поля и турбулентных составляющих может привести к изменению интенсивности и спектра турбулентных пульсаций. Если частота колебаний совпадает с частотой колебаний относительно больших вихрей, которые в основном обуславливают турбулентное перемешивание жидкости, то наступает *турбулентный резонанс*, приводящий к усилению интенсивности турбулентных пульсаций [29].

В РЕЗУЛЬТАТЕ МНОГОКРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН ОТ ГРАНИЦ ВНУТРЕННИХ ОБЪЕМОВ АППАРАТОВ ВОЗНИКАЕТ ЗАМКНУТОЕ ТРЕХМЕРНОЕ ВОЛНОВОЕ ПОЛЕ [30]. ОБЫЧНО ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ АППАРАТА БОЛЬШЕ ДЛИНЫ ЗВУКОВЫХ ВОЛН. ЗАМКНУТЫЙ ОБЪЕМ АППАРАТА ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ СО СПЕКТРОМ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ, ПРИ ЭТОМ КАЖДОЙ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЕ СООТВЕТСТВУЕТ СВОЙ ДЕКРЕМЕНТ ЗАТУХАНИЯ. ЕСЛИ ИСТОЧНИК ЗВУКА СОЗДАЕТ ЗВУКОВЫЕ СИГНАЛЫ С МЕНЯЮЩИМСЯ СПЕКТРАЛЬНЫМ И АМПЛИТУДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ, ТО ЭТИ СИГНАЛЫ ВОЗБУДЯТ КОЛЕБАНИЯ СРЕДЫ В АППАРАТЕ С ЧАСТОТАМИ, БЛИЗКИМИ К РЕЗОНАНСНЫМ, И ПО МЕРЕ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРА БУДУТ ВОЗНИКАТЬ ВСЕ НОВЫЕ И НОВЫЕ МОДЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗАМКНУТОГО ОБЪЕМА, КОТОРЫЕ, ИСКАЗЯТ НАЧАЛЬНЫЙ СИГНАЛ. ПОСКОЛЬКУ ДЕКРЕМЕНТ ЗАТУХАНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ СПЕКТРА ЧАСТОТ РАЗЛИЧЕН, ТО КАЖДАЯ ИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЧАСТОТ ИМЕЕТ СВОЕ ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ.

В зависимости от формы аппарата в замкнутом объеме могут возникнуть *собственные колебания* с различным набором *собственных частот*, соответствующих плоским, цилиндрическим или

сферическим волнам. Рассмотрим подробно фундаментальные функции и резонансные частоты прямоугольного объема. Для этого необходимо найти решение уравнения Гельмгольца [30]

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \psi = 0, \quad (2.33)$$

**удовлетворяющего граничным условиям:**

$$-\frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{x=0}^{x=l_x} = 0; \quad -\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{y=0}^{y=l_y} = 0; \quad -\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=0}^{z=l_z} = 0. \quad (2.34)$$

Нетрудно показать, что такими решениями будут частные решения вида

$$\psi_{mnp} = A_{mnp} \cos \frac{m\pi x}{l_x} \cos \frac{n\pi y}{l_y} \cos \frac{p\pi z}{l_z}. \quad (2.35)$$

Здесь  $\psi_{mnp}$  – потенциал скорости колебаний;  $x$  – координата по оси  $X$ ;  $y$  – координата по оси  $Y$ ;  $z$  – координата по оси  $Z$ ;  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $p = 1, 2, 3, \dots$  – моды колебаний;  $c$  – фазовая скорость распространения упругих волн в свободном пространстве.

Таким образом, в прямоугольном аппарате, ограниченном идеально жесткими стенками, существует дискретный спектр резонансных круговых частот, определяемых выражением

$$\omega_{mnp} = \pi c \sqrt{\frac{m^2}{l_x^2} + \frac{n^2}{l_y^2} + \frac{p^2}{l_z^2}}. \quad (2.36)$$

**Фундаментальные функции и собственные частоты цилиндрического объема находят как решение волнового уравнения в цилиндрических координатах при граничных условиях:**

$$\frac{\partial \psi(r, \varphi, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=a} = 0; \quad \frac{\partial \psi(r, \varphi, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0}^{z=h} = 0. \quad (2.37)$$

В результате получают, что в цилиндрическом объеме возможны колебания, определяемые следующими функциями:

$$\psi_{mnp}^{(l)} = A_{mnp}^{(l)} I_m \left( \pi \alpha_{mn} \frac{r}{a} \right) \cos m\varphi \cos \left( p\pi \frac{z}{h} \right) \cos(\omega_{mnp} t + \beta_{mnp}^{(l)}); \quad (2.38)$$

$$\psi_{mnp}^{(0)} = A_{mnp}^{(0)} I_m \left( \pi \alpha_{mn} \frac{r}{a} \right) \cos m\varphi \cos \left( p\pi \frac{z}{h} \right) \cos(\omega_{mnp} t + \beta_{mnp}^{(0)}), \quad (2.39)$$

где  $\psi_{mnp}^{(l)}$  и  $\psi_{mnp}^{(0)}$  – потенциал скорости симметричных и несимметричных колебаний;  $\pi \alpha_{mn}$  – корни уравнения  $I_m'(x) = 0$ ;  $r$  и  $\varphi$  – полярная и угловая координаты точек цилиндрического объема;  $z$  – координата по оси  $Z$ ;  $a$  – радиус цилиндра;  $h$  – его высота;  $\beta_{mnp}^{(l,0)}$  – фазы колебаний.

Собственные круговые частоты цилиндрического объема

$$\omega_{mnp} = \pi c \sqrt{\left( \frac{\alpha_{mn}}{a} \right)^2 + \left( \frac{p}{h} \right)^2}. \quad (2.40)$$

Фундаментальные функции и собственные частоты для сферического объема можно найти, решая уравнение Гельмгольца в сферических координатах  $r, \theta, \varphi$  при граничном условии  $\partial \psi / \partial r_{r=a} = 0$ .

Решение этого уравнения выражается посредством сферических функций  $Y_m$  и функций Бесселя полуцелого порядка:

$$\psi(r, \theta, \varphi, t) = A_m Y_m(\theta, \varphi) j_m(k, r) e^{j\omega t},$$

где  $Y_m(\theta, \varphi) = P_m(\cos \theta) + \sum_{n=0}^m (a_{mn} \cos n\varphi + a'_{mn} \sin n\varphi) P_m^{(n)}(\cos \theta)$  – сферическая функция  $m$ -го порядка.

Собственные круговые частоты колебаний сферического объема

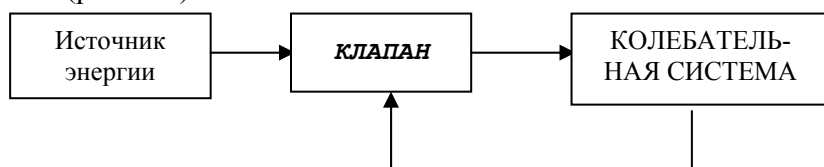
$$\omega_{mn} = \frac{\pi \beta_{mn}}{a} c, \quad (2.41)$$

где  $\pi \beta_{mn}$  – корни уравнения  $I_m(x) = 0$ ;  $a$  – радиус сферы;  $c$  – скорость звука.

Собственная частота колебаний связана с круговой частотой соотношением  $f = \omega/2\pi$ .

*Автоколебаниями* называют колебания, не вызываемые внешней периодической силой, в этом их отличие от вынужденных колебаний [31].

*Автоколебательная система* – устройство, способное генерировать колебания на основе преобразования постоянного движения в колебательное и характеризующееся наличием источника энергии, колебательной системы, клапана, пропускающего энергию от источника к колебательной системе периодическими порциями, и обратной связи со стороны колебательной системы, управляющей работой клапана (рис. 2.5).



**Рис. 2.5** Схема автоколебательной системы

Устойчивый режим автоколебаний определяется энергетическим балансом, т.е. равенством энергии, подводимой от источника к колебательной системе, и энергии, теряемой системой. При этом можно различать два случая: если автоколебания происходят с заданной частотой, то условие энергетического баланса определяет установившуюся амплитуду автоколебаний; если же автоколебания происходят с заданной амплитудой, то условие баланса определяет частоту автоколебаний.

В линейной системе устойчивые автоколебания невозможны.

Различают мягкое и жесткое самовозбуждение автоколебаний. В первом случае система самостоятельно раскачивается из положения покоя. Во втором случае для возбуждения системы требуется начальный толчок.

Мягкое и жесткое самовозбуждения связаны со свойством устойчивости. Мягким самовозбуждением обладает система, динамически неустойчивая в положении покоя, жестким самовозбуждением – система, устойчивая в положении покоя.

Для того чтобы автоколебания были возможны, необходимо, чтобы в колебательную систему периодически вкладывалась энергия. Это означает, что переменная сила, возникающая в результате действия обратной связи и клапана, должна совершать за каждый цикл движения определенную работу. Но это невозможно, если сила есть однозначная функция положения системы. Для того чтобы работа могла быть совершена, необходима по меньшей мере двузначная зависимость силы от смещения [31].

### 2.3 ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР

Протекание электрического разряда в жидкости (*электрогидравлического удара*) вызывает сложный комплекс явлений: ионизацию и разложение молекул в плазме канала и возле него, световое излучение канала разряда, ударные волны, интенсивное ультразвуковое излучение, пульсацию газового пузыря, кавитационные процессы, импульсные магнитные поля [32, 33]. Различают две стадии процесса. Первая стадия продолжается от подачи напряжения на электроды до завершения пробоя. Время пробоя зависит от полярности и напряжения. При пробое имеют место следующие зоны.

1. Зона искрового разряда (цилиндрической формы диаметром 0,7 – 1 мм). Компоненты в этой зоне превращаются в низкотемпературную плазму (с температурой около  $3 \times 10^4$  °С), которая является преобразователем электрической энергии в механическую и в энергию электромагнитного излучения.

2. Зона разрушения, где компоненты частично разрушаются на дисперсные частицы, а частично сжимаются и приобретают характер твердого тела. Зона имеет форму сфероида, объем которого в 3 – 5 раз больше объема разрядного канала; давление здесь падает в 2 – 3 раза, а плазма охлаждается до 700 °С.

3. Зона наклепа, где компоненты находятся в состоянии твердого упругого тела. Объем зоны, имеющей сферическую форму, в 6 – 7 раз больше объема зоны искрового канала; давление в ней составляет

10 – 500 МПа, температура 300 – 500 °С.

4. Зона наклепа, где компоненты находятся в состоянии жидкого упругого тела. Зона имеет почти правильную сферическую форму и объем, в 20 – 30 раз превышающий объем искрового канала, давление

2 – 4 МПа, температуру 80 – 150 °С.

5. Зона сжатия, в которой наблюдаются перемещения больших объемов жидкости. Объем зоны в 100 – 200 раз больше объема искрового канала, давление приближается к атмосферному, а температура

–  
к температуре перемешиваемых компонентов.

Разряд протекает за 20 – 30 мкс и сопровождается яркой вспышкой, имеющей следующий спектр: 91 % энергии свечения – ультрафиолетовые лучи, 8 % энергии – видимые лучи, 1 % – инфракрасные лучи.

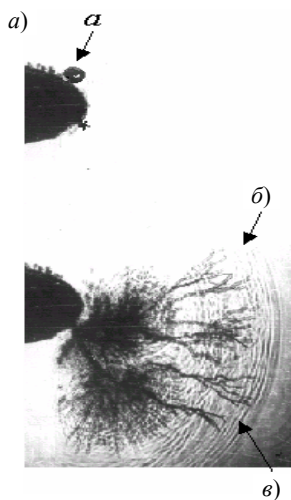
Наибольший вклад в развитие смещения вносит вторая стадия процесса электрогидравлического разряда, характеризующаяся появлением ударных волн как главного турбулизирующего фактора.

Независимо от жидкости, в которой происходит разряд, во фронте ударной волны имеется область сильно сжатой среды, перемещающейся в пространстве со сверхзвуковой скоростью. При подходе ударной волны к некоторой точке пространства давление и плотность возрастают резким скачком, затем следует постепенное изменение этих величин, причем через некоторый промежуток времени давление и плотность становятся меньше, чем те же параметры в невозмущенной среде.

Величина давления фронта ударной волны при электрическом разряде в начальный период достигает  $(5 \dots 8) \times 10^7$  МПа, продолжительность действия волны – 0,3 с, частота –  $3 \times 10^6$  Гц, скорость распространения превышает скорость звука. В радиусе до 0,4 м ударная волна сохраняет давление более 2 МПа, что соответствует усилию, создаваемому высокоскоростной механической мешалкой при развитом турбулентном процессе в зоне наиболее интенсивного перемешивания. После прекращения поступления энергии расширение продуктов разряда сопровождается охлаждением и рядом внутренних превращений, в результате которых в жидкости образуется парогазовая полость, внутренняя энергия полости и кинетическая энергия жидкости обуславливают ее радиальные колебания, в процессе которых имеет место изменение давления в  $10^3$  –  $10^4$  раз.

По сравнению с первичной ударной волной продолжительность пульсации полости в 30 – 45 раз больше, а максимальное давление и плотность потока энергии в 10 раз меньше. Подобно первичной ударной волне пульсация парогазовой полости способствует перемешиванию компонентов. Явление электрического разряда сопровождается также мощными кавитационными процессами.

При воздействии первых импульсов напряжения область оптической неоднородности вблизи заостренного электрода излучает свечение, которое может отождествляться с ионизацией газа [34]. С каждым следующим импульсом его появление происходит позже за счет выравнивания электрического поля вблизи высоковольтного электрода из-за локального удаления микроострий на аноде и это связано с локальным вскипанием жидкости в этих точках (рис. 2.6, а). Образование кавитационных пузырьков происходит уже на начальной стадии формирования электрического разряда, практически с момента его зажигания, и является результатом взаимодействия ударных волн (рис. 2.6, в), инициируемых высокоскоростными стримерными образованиями (рис. 2.6, б). Газовые образования продуктов распада незавершенных стримерных каналов в воде достаточно устойчивы и имеют тенденцию к увеличению объема путем их объединения (рис. 2.7, б) [34].



**Рис. 2.6. Теневые фотографии начальной стадии формирования разряда при пробое воды [34]:**

а – газовые образования на поверхности электрода; б – нитевидная структура стримерных каналов; в – ударные волны, формируемые развивающимися стримерными каналами (радиус острия 150 мкм, первый кадр через 50 нс после приложения напряжения, второй кадр через 150 нс, увеличение в 50 раз)

Анализ изменений макроструктуры при искровом разряде свидетельствует о том, что после разряда появляется множество пузырьков, занимающих до 20 % всего объема жидкости в окрестностях пробоя, спустя 3 – 4 мин они занимают 5 – 7 % объема. В результате смыкания кавитационных полостей возникает ударная волна, действующая на расстоянии порядка радиуса полости (3 – 5 мм), при этом давление может достигнуть 30 МПа.

Для начальной стадии образования и развития кавитационной полости характерным является возникновение больших энергетических напряжений; они могут вызвать электронный пробой, который в свою очередь вызывает излучение в спектре видимых и ультрафиолетовых лучей.

а – газовые образования, б – кавитационные ансамбли, увеличение в 50 раз

## 2.4. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

### 2.4.1. Звукокапиллярный эффект

*Звукокапиллярный эффект* – аномально глубокое проникновение жидкости в капилляры и узкие щели под действием звуковых волн. При этом глубина проникновения значительно превышает соответствующие величины, обусловленные силами поверхностного натяжения жидкости [35]. Механизм звукокапиллярного эффекта заключается в том, что жидкость поднимается по капиллярам в результате импульсов давления, возникающих при захлопывании кавитационных полостей, локализованных в сече-

нии капилляра. Сила, возникающая вследствие захлопывания кавитационных пузырьков, действует на жидкость у входа в капилляр. Направление силы совпадает с направлением действия звуковой волны.

Перемещение жидкости происходит внутри капилляра, вдоль его оси, направление перемещения совпадает с направлением действия силы. Продолжительность импульсов давления может оцениваться по времени максимального давления при захлопывании полости.

За время захлопывания  $t$  жидкость в капилляре приобретает начальную скорость  $V_i$ , а дальше продолжает двигаться по инерции до момента следующего захлопывания кавитационной полости. Высота, на которую поднимается жидкость за один период колебаний  $T$ , составляет  $\Delta h_i = V_i(T - t)$ . Величина  $V_i$  вычисляется с учетом сечения капилляра, массы столба жидкости и сил вязкого трения, препятствующих подъему жидкости. Общая высота подъема жидкости в капилляре

$$h \approx h_0 + \sum_{i=1}^n \Delta h_i, \quad (2.42)$$

где  $h_0$  – высота подъема, определяемая силами поверхностного натяжения;  $n$  – число колебаний на момент отсчета. Жидкость поднимается по капилляру под воздействием динамических пульсаций только при условии, что кавитационная область, состоящая из пульсирующих и захлопывающихся пузырьков, находится непосредственно под капилляром. Нарушение локализации в окрестностях основания капилляра кавитационных пузырьков и уход их приводит к мгновенному опусканию жидкости до уровня, определяемого силами поверхностного натяжения.

Интенсивность звуковых и кавитационных динамических пульсаций, температура жидкости имеют определенные оптимальные значения, при которых звукокапиллярный эффект наиболее выражен. Звукокапиллярный эффект в десятки и сотни раз ускоряет процессы пропитки пористо-капиллярных материалов и выделения ценных веществ, поэтому он применяется при пропитке катушек трансформаторов клеями и лаками, при дублении кож, экстрагировании биологически активных веществ из растительного и другого сырья и окрашивании толстых тканей. Эффект используется при металлизации сложных изделий, так как обеспечивает хорошее проникновение горячего припоя во все зазоры.

## 2.4.2 Турбулентность и вихреобразование

Причиной возникновения турбулентности часто являются неустойчивости, они исчерпывающе исследованы и достаточно понятны. Однако существует относительно меньшее понимание процессов, связывающих зарождение турбулентности и ее «взрывное» развитие, т.е. понимание того, как от бесконечно малого возмущения, возникшего в одной области сплошной среды, система ниже по течению становится полностью турбулентной [36].

Динамические системы, которые подчиняются нелинейным уравнениям движения, могут по-разному становиться непредсказуемыми. Расчеты, основанные на самых различных математических моделях, показали, что этот путь к хаосу подчиняется законам, обладающим общностью, и эти законы были подтверждены также экспериментами на множестве реальных систем. К реальным системам, которые подчиняются этим законам, относятся системы с конвекцией [36].

Когда течение жидкости в трубе ламинарно, профиль скорости становится независимым от координаты  $x$  вдоль ее оси, если  $x$  больше так называемой длины начального участка. Будучи осредненным по времени, турбулентное течение в трубе также становится не зависящим от  $x$  при больших значениях  $x$ , и по достижении этого состояния турбулентность называют *полностью развитой турбулентностью*.

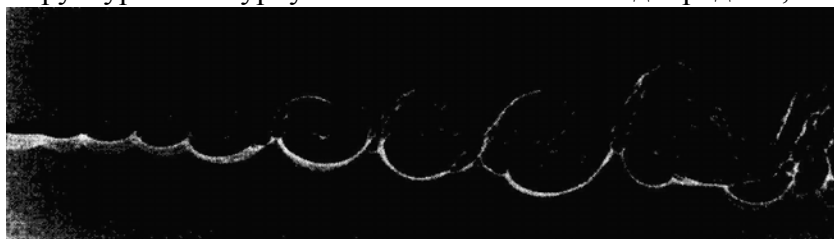
Структура турбулентности, характеризующая течение в трубе, довольно сложна из-за наличия самой трубы, поэтому статистические теории обычно применяются, в первую очередь, к идеальному случаю *однородной турбулентности*. Этот случай можно попытаться реализовать в эксперименте, пропуская поток среды с постоянной скоростью через равномерную проволочную решетку. Срывающиеся с прутьев решетки вихри сливаются и ниже по течению образуют *турбулентное поле*, которое можно считать развитым и структура которого не зависит от координат. Она немного должна меняться в зави-



симости от расстояния от решетки, по мере того, как диссипация забирает свою долю кинетической энергии турбулентности, но это продольное изменение обычно является достаточно медленным и им можно пренебречь.

В этом случае турбулентность может быть не только однородной, но и практически *изотропной*, если ее рассматривать в системе координат, которая движется относительно решетки [36].

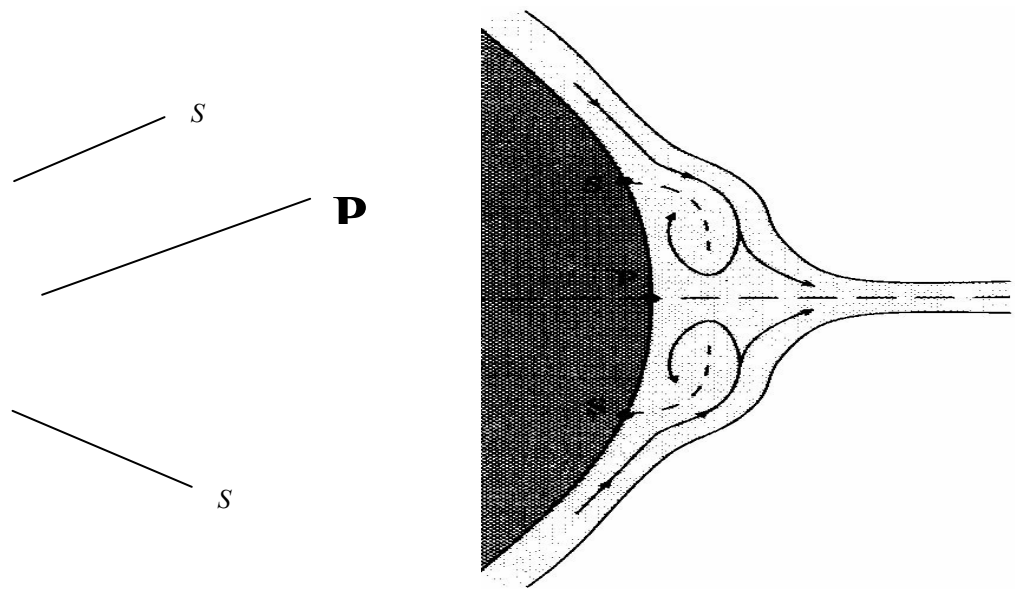
Теневая фотография на рис. 2.8 представляет собой мгновенный вид сбоку двух потоков газа, которые движутся слева направо. Вначале потоки были разделены тонкой пластиной, край которой совпадает с левой кромкой поля снимка [36]. После прохождения пластинки потоки смешиваются друг с другом. За пределами пограничного слоя скорости в одном газе и в другом постоянны, но в слое смешения движение характеризуется спиральными структурами, которые отличаются регулярностью. Размер спиралей, шаг между ними, растут с расстоянием от точки образования слоя смешения систематически. Структура этой турбулентности не является однородной, такие структуры называются *когерентными*.



**Рис. 2.8.** Теневая фотография турбулентного слоя смешения между потоками гелия (сверху) и азота (внизу) при давлении 4 атм; потоки движутся слева направо с разными скоростями (средняя скорость 7 м/с) [36]

В огромном количестве случаев одна неустойчивость ведет к другой, и в конечном итоге образуется *турбулентное движение*, которое вовсе не является упорядоченным. *Ламинарное течение* в трубе, к которому применим закон Пуазейля, становится турбулентным, когда число Рейнольдса достигает критического значения. Это значение может составлять всего 2300, если труба имеет так называемый «*негладкий вход*», т.е. равномерное поперечное сечение и срезанную под прямым углом торцевую кромку. При  $Re \approx 2300$  длина начального участка такой трубы составляет порядка 70 диаметров. Такой длины достаточно, чтобы отдельные первичные вихри вырвались из-под контроля прежде, чем их «задавит» вязкость. Эти первичные вихри порождают более мелкие вторичные, те, в свою очередь, еще более мелкие и так до тех пор, пока в результате не возникнет турбулентность.

На рис. 2.9 подробно показана задняя часть цилиндра, покрытая пограничным слоем (слабо заштрихованная часть рисунка), который еще несколькими мгновениями раньше не был оторван от поверхности и имеет более-менее постоянную толщину; его продолжением служит след, идущий вниз по потоку. Жидкость, которая в каждой из половинок рисунка, от точки  $P$  до точки  $S$ , участвует в *возвратном течении*, берется из пограничного слоя и накапливается вблизи точки  $S$ , тем самым вынуждая натекающую жидкость двигаться в направлении от поверхности. Проходящий через точки  $S$  на рисунке пунктир обозначает поверхности, отделяющие жидкость, вовлеченную в возвратное движение, и жидкость, которая еще не вовлечена в него. Если бы эти линии были стационарны, их можно было бы назвать линиями тока, но они таковыми не являются: как и *точки отрыва*  $S$ , из которых они исходят, эти линии отодвигаются от точки  $P$  по мере накопления жидкости под ними. Точно так же линии со стрелками не обязательно являются линиями тока, но они дают представление о том, куда направляется натекающая жидкость.



**Рис. 2.9. Ранняя стадия формирования двух вихрей за цилиндром [36]**

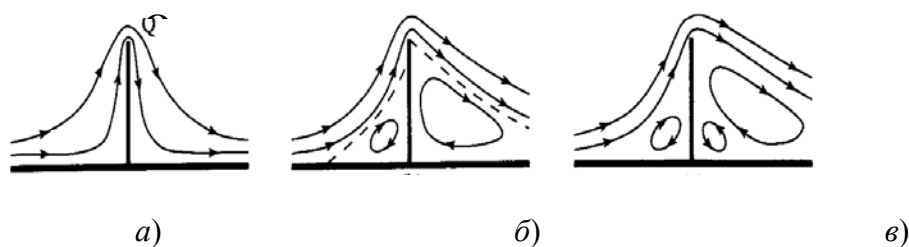
Жидкость в пограничном слое, которая накапливается позади цилиндра, в верхней половине рисунка несет *завихренность*, направленную по часовой стрелке, а в нижней половине – направленную против часовой стрелки, хотя часть этой завихренности теряется на поверхности цилиндра между точками *P* и *S*. Наличие этой завихренности означает, что в прилегающей области жидкость вовлекается в движение по часовой стрелке и против нее. С течением времени пограничный слой сворачивается, образуя за цилиндром два вращающихся вихря, которые непрерывно растут в размерах по мере того, как в них вовлекается все больше и больше натекающей жидкости.

Наличие вихрей характерно для обтекания любых затупленных тел. Чем быстрее расходятся линии тока в безвихревой области вне пограничного слоя, тем больше вероятность отрыва, поэтому образованию вихрей благоприятствуют острые кромки или углы, где мал радиус кривизны поверхности тела. Например, вихри легко образуются за тонкой пластиной, обращенной своей плоскостью к потоку. Для того, чтобы вихри были видны при малых скоростях, в воду или на ее поверхность нужно ввести какой-нибудь порошок, но при больших скоростях впадина на поверхности воды, связанная с каждым вихрем, видна и безо всякого порошка. Подобные вихри часто можно наблюдать в реках, позади запруд или камней.

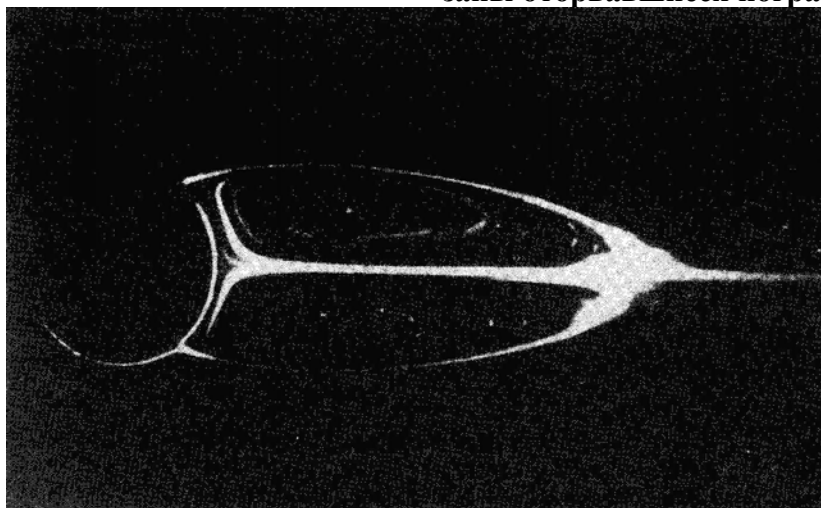
Вихри могут образовываться не только за препятствиями, но и перед ними. На рис. 2.10, *a* показаны некоторые линии тока, которыми, при отсутствии отрыва пограничного слоя, могло бы описываться обтекание вертикальной стенки. Расстояние между линиями тока увеличивается вблизи точки *P*, а также за верхом стенки, вблизи точки *Q*. Поэтому в обоих этих местах происходит отрыв, результатом которого является образование двух вихрей, как показано на рис. 2.10, *б*. Оторвавшиеся пограничные слои показаны на рисунке пунктиром; видно, что слой, оторвавшийся в точке *P*, вновь присоединяется к стенке. Дальнейший отрыв может происходить на задней стороне стенки, что приводит к образованию вторичного вихря, как показано на рис. 2.10, *в* [36].

Фотография, приведенная на рис. 2.11, была сделана при условиях, отвечавших  $Re = 41$ , путем приведения в движение относительно воды цилиндра, поверхность которого предварительно была покрыта сгущенным молоком. Мы можем считать цилиндр неподвижным, а воду на больших расстояниях от него – движущейся слева направо с постоянной скоростью, хотя на самом деле цилиндр двигался справа налево. Выдержка при съемке была короткой и снимок дает картину линий меченых частиц за точками отрыва потока. Мечеными частицами в данном случае служат частицы молока, попавшие в жидкость и унесенные ей. Линии тока представляют собой спирали и дают яркую картину формирования вихрей. Диффузия молока в воде много меньше, чем диффузия завихренности, поэтому ширина белых полосок

на рис. 2.11 много меньше толщины пограничного слоя [36].



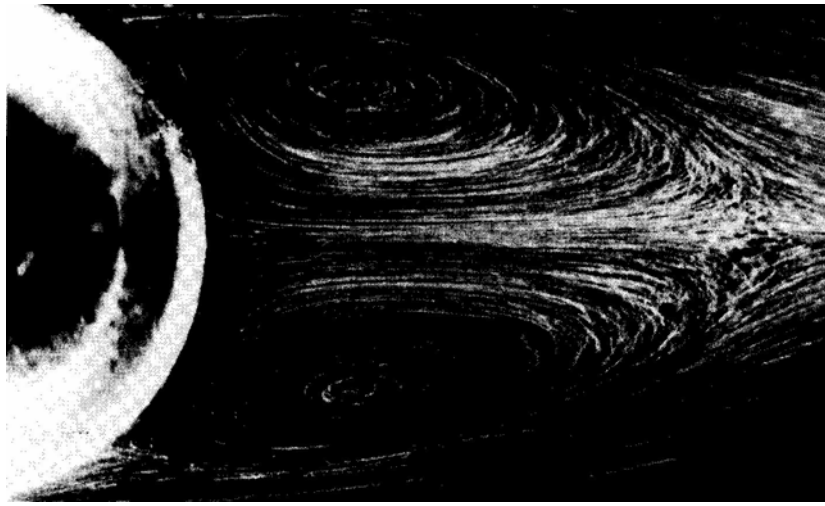
**Рис. 2.10. Линии тока для стационарного потока воздуха, обтекающего стенку. Пунктиром показаны оторвавшиеся пограничные слои**



**Рис. 2.11. Вихри за цилиндром при  $Re = 41$ . Цилиндр неподвижен, поток воды движется слева направо [36]**

Эксперименты показывают, что картина течения вокруг поперечно расположенного в потоке цилиндра в диапазоне  $6 < Re < 41$  (оба предела приблизительно) характеризуется наличием стационарных вихрей, похожих на вихри, показанные на рис. 2.11. При уменьшении  $Re$  они сокращаются в размерах и при достижении нижнего предела становятся исчезающе малыми. В диапазоне  $1 < Re < 6$  линии тока вокруг цилиндра не вполне симметричны в экваториальной плоскости, каковыми они являются в области еще меньших чисел  $Re$ , где работает приближение ползущего течения, но эта асимметрия не так велика, как асимметрия, показанная на рис. 2.10. При числах  $Re$  выше 41 вихри начинают осциллировать, и их дальнейший рост ограничивается тем фактом, что часть жидкости, захваченная каждым вихрем, периодически отрывается от цилиндра.

Большинство из сказанного качественно относится и к обтеканию сферы. Критическое значение числа Рейнольдса, при котором начинается формирование вихрей, для сферы равно 24, а стабильными вихри остаются вплоть до  $Re \approx 130$ . Фотография, приведенная на рис. 2.12, была сделана для случая обтекания сферы при  $Re = 118$ ; вода содержала частицы алюминиевой пудры, равномерно распределенной в виде суспензии, но видимой только в одной плоскости при освещении через узкую щель [36]. Вихрь представляет собой единое тороидальное



**Рис. 2.12. Поперечное сечение кольцевого вихря за сферой при  $Re = 118$  [36]**

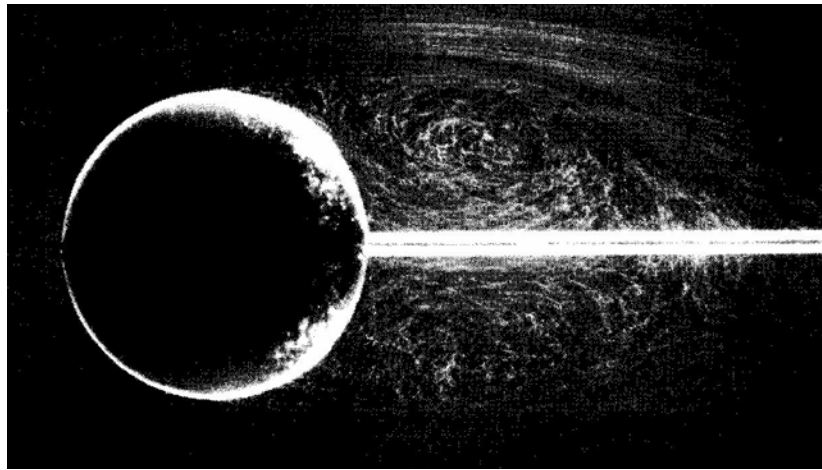
образование, в то время как на рис. 2.11 было два отдельных вихря, простирающихся на неопределенную длину. *Тороидальный вихрь* начинает осциллировать, когда  $Re$  превышает верхний предел порядка 130, а при дальнейшем увеличении  $Re$  происходит срыв вовлеченной в вихри жидкости.

Рассмотрим спонтанный срыв вихрей, связанный не с внешними возмущениями, а с самим потоком. Процесс начинается с потери устойчивости потоком в следе за цилиндром, неустойчивость передается вихрям, вызывая их колебания. С ростом  $Re$  амплитуда колебаний увеличивается, и при  $Re$  порядка 60 начинается периодический срыв вихрей. Вначале количество оторвавшейся за один период жидкости составляет лишь малую долю полного содержимого вихря. Однако при достижении  $Re$  порядка 100 вихри срываются почти полностью, лишь перестраиваясь перед очередным срывом.

Вихри по обе стороны цилиндра срываются попеременно, с четко определенной частотой, которая слабо зависит от  $Re$ . В следе за цилиндром образуется регулярная структура, известная как *вихревая дорожка Кармана* (рис. 2.13). Карман изучал такие образования из идеальных свободных вихревых линий и установил, что они устойчивы по отношению к малым отклонениям в положении вихрей тогда и только тогда, когда отношение  $D/L$ , где  $D$  – расстояние между рядами положительных и отрицательных вихрей, а  $L$  – шаг между вихрями в каждом



**Рис. 2.13. Вихревая дорожка Кармана в воде, идущая слева направо за цилиндром при  $Re = 105$  [36]**



**Рис. 2.14. Течение возле сферы при  $Re = 15\ 000$  [36]**

ряду, равно 0,283. Вихри, показанные на рис. 2.13, действительно располагаются таким образом [36].

Для тороидальных вихрей, которые образуются за сферой, также характерен периодический срыв. Они отрываются от сферы не все сразу, а поочередно, начиная с одной ее стороны в одном полупериоде, и переходя на другую сторону в следующем полупериоде. Поэтому в следе за сферой, когда  $Re$  превышает 400, образуется цепочка эллиптических вихрей, которые наклонены к оси потока и связаны друг с другом, а не коаксиальных и изолированных круглых колец [36].

Для турбулентных потоков осредненные по времени картины течения однозначно определяются величиной числа  $Re$ , даже если для мгновенных картин течения это не так. На рис. 2.14 приведена картина обтекания водой неподвижной сферы при  $Re \approx 15\ 000$ . Белые полосы – это следы, оставленные маленькими пузырьками воды, имеющимися в воде, и все вместе они дают представление о характере осредненного по времени течения, которое реализуется при данных условиях; фотография цилиндра, а не сферы, выглядела бы очень похоже. При таких значениях числа Рейнольдса пограничный след действительно тонок. Видно, что он отрывается от сферы вблизи экватора (на самом деле в точках немного выше по течению) и простирается далее как граница раздела между областью, где течение стационарно – или, по крайней мере, выглядит таковым после осреднения по времени – и областью, где оно явно турбулентно.

При числах  $Re$ , которые еще высоки – порядка  $2 \cdot 10^5$  – точка отрыва смещается вниз по потоку. В результате размер турбулентной области резко уменьшается; то же происходит со скоростью диссипации энергии в следе. Этот эффект связан с внезапным образованием турбулентности в самом пограничном слое, причем в той его области, где слой еще не оторвался от препятствия, а не в области ниже по потоку от точки отрыва. На качественном уровне объяснение этого таково: процесс образования возвратного течения, приводящего к отрыву пограничного слоя, тормозится инерцией жидкости в пограничном слое. Когда пограничный слой становится турбулентным, скорость обмена направленным вперед количеством движения между соседними элементами жидкости до некоторой степени возрастает. Следовательно, в дальнейшем инерция жидкости будет противодействовать всякой тенденции к ее замедлению вблизи поверхности препятствия и к изменению направления ее движения [36].

### 2.4.3 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР

*Гидравлический удар* – результат резкого изменения давления в жидкости, вызванный мгновенным изменением скорости ее течения в трубопроводе [35].

Явления, происходящие при гидравлическом ударе, объясняются на основе свойства сжимаемости капельных жидкостей. После закрытия задвижки на горизонтальном трубопроводе постоянного диаметра, по которому движется жидкость со средней скоростью  $V$ , слой жидкости, находящийся непосредственно у задвижки, мгновенно останавливается. Затем последовательно прекращают движение слои жидкости (завихрения, противотоки) на увеличивающемся со временем расстоянии от задвижки. При

этом уплотняется ранее остановившаяся масса жидкости и в результате повышения давления несколько расширяется труба. В трубу войдет дополнительный объем жидкости.

Так как жидкость сжимаема, то вся ее масса в трубопроводе не останавливается мгновенно. Граница объема, включающего в себя остановившуюся жидкость, перемещается от задвижки вдоль трубопровода с некоторой скоростью  $c$ , называемой скоростью распространения волны давления.

Давление у задвижки до ее закрытия было  $p$ , а давление, возникшее после остановки,  $p + \Delta p$ . Величина  $\Delta p$ , найденная на основании теоремы количества движения, равняется  $\Delta p = \rho c V$ , где  $\rho$  – плотность жидкости;  $c$  – скорость распространения ударной волны (формула Н.Е. Жуковского).

Далее останавливается второй слой жидкости, на который давят следующие слои, и т.д. Постепенно повышенное давление, возникшее первоначально непосредственно у задвижки, распространяется далее по всему трубопроводу против течения жидкости со скоростью  $c$ .

Если давление в начале трубопровода сохраняется неизменным (в случае, когда трубопроводом забирается вода из открытого бассейна с большой площадью поверхности), то после достижения ударной волной начального сечения трубы, в ней начинается обратное перемещение ударной волны с той же скоростью  $c$ , причем это есть уже волна понижения давления. Одновременно в трубе возникает движение жидкости по направлению к начальному сечению.

По достижении ударной волной сечения у задвижки давление здесь снижается и делается меньшим, чем первоначальное давление до удара; после этого начинается перемещение ударной волны, но уже волны понижения давления, в направлении начала трубопровода. Циклы повышений и понижений давления будут чередоваться и далее через промежутки времени, равные времени двойного пробега ударной волной длины трубопровода от задвижки до начала трубопровода.

Таким образом, при гидравлическом ударе жидкость, находящаяся в трубопроводе, будет совершать колебательные движения, которые в силу гидравлических сопротивлений и вязкости, поглощающих первоначальную энергию жидкости на преодоление трения, будут затухающими. Скорость распространения волны зависит от рода жидкости, материала трубы, ее диаметра и толщины стенок.

Гидравлический удар проявляется, как правило, в трубопроводах гидросистем. Давление, обеспечивающее движение жидкости в трубопроводе, приложено ко всей жидкости и стенкам трубопровода. Сила приложена к задвижке. Давление гидроудара возникает в жидкости перед задвижкой в момент перекрытия трубопровода.

Гидравлический удар проявляется в гидромашинах различного назначения. В большинстве случаев это нежелательное явление, приводящее к разрушению трубопроводов. На основе гидравлического удара разработаны устройства для подъема воды, сжатия воздуха, интенсификации ХТП и др. Используя силу гидравлического удара, устраивают особые насосы, так называемые гидравлические тараны, служащие для поднятия жидкости, а также создают устройства с импульсным динамическим воздействием на обрабатываемую жидкость.

## 2.5 МЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ

При высокой интенсивности подвода энергии к твердому телу большая часть ее аккумулируется на новой, свежеобразованной поверхности при разрушении частиц, а также в большом количестве различного вида дефектов структуры и остаточного напряженного состояния около них [37]. Исследования [37, 39] показывают, что эту накопленную энергию можно использовать для интенсификации различных процессов с участием активированной твердой фазы:

- существенного повышения реакционной способности твердых тел;
- ускорения твердофазных и каталитических реакций и реакций в полимерных системах;
- повышения скоростей диффузии, тепло- и массообмена при реализации комбинированных процессов в системах газ – твердое тело, жидкость – твердое тело;
- увеличения растворимости, т.е. скоростей растворения, и сублимации твердых тел;
- изменения реологических и физико-химических свойств полимерных и коллоидных систем;
- получения новых композиционных материалов с уникальными физико-механическими свойствами и т.д.

Процессы *механической активации* твердых тел особенно интенсивно осуществляются при тонком измельчении частиц в мельницах различного конструктивного оформления. Удельные затраты энергии (кВт·ч/т) зависят от твердости (прочности) измельчаемых или механоактивируемых веществ, конечной дисперсности порошков и типа измельчающей машины.

При невысоких значениях приложенной нагрузки *деформация* (смещение, отнесенное к единице длины) и *напряжение* (сила, отнесенная к единице площади) в большинстве твердых тел связаны линейным соотношением и не зависят от времени действия нагрузки. Если при снятии нагрузки восстанавливается исходная форма тела, то деформация называется *упругой*. При упругой деформации может наблюдаться постепенное возникновение микротрещин под нагрузкой и их смыкание при снятии нагрузки. Если снятие внешних сил не приводит к мгновенному уменьшению деформации, то наблюдается *неупругая* деформация. При сохранении деформации после снятия нагрузки деформация называется *пластической*, а величина напряжения, соответствующая пластической деформации, называется пределом упругости. Разрушение твердого тела с возникновением пластических деформаций называется *пластическим*, а без заметной пластической деформации – *хрупким* [40, 41].

Наиболее важным типом деформации является *сдвиг* (скольжение), при котором происходит перемещение двух частей твердого тела по определенной кристаллографической плоскости под действием деформирующих напряжений. Сдвиг зарождается в определенном месте линейного дефекта кристаллической решетки в виде краевой или винтовой *дислокации*.

В плоскости скольжения образуется скопление дислокаций, возникающих при их блокировке препятствием. При этом на препятствие действует касательное напряжение, превышающее приложенное и пропорциональное числу дислокаций в скоплении. Концентрация напряжений может привести к слиянию ведущих дислокаций и образованию зародышевой микротрещины. Трещина будет распространяться через область высокой концентрации напряжений в конце полосы скольжения и остановится, если ее длина меньше критического размера, необходимого для самопроизвольного распространения.

При воздействии переменных нагрузок уже на начальной стадии процесса разрушения формируются микротрещины. Имеющиеся в частице и вновь образованные микротрещины и микродефекты постоянно растут, сливаются и формируют макротрещины. Распространение макротрещин ослабляет частицу и приводит к ее лавинному разрушению.

При импульсных (ударных) воздействиях возникающие напряжения достигают значительных величин из-за кратковременности нагрузки. Величина напряжения в любой точке определяется наложением падающей и отраженной ударных волн. Наложение этих волн может вызвать высокие напряжения, приводящие к разрушению.

При крупном измельчении размеры дефектов и микротрещин ничтожно малы по сравнению с размерами измельченных частиц и их разрушение происходит по поверхностям наибольших напряжений с раскрытием дефектов одного наивысшего порядка. В области тонкого и сверхтонкого измельчения, когда размеры дефектов соизмеримы с размерами частиц, при той же объемной плотности микротрещин их количество мало. Поэтому образование новых поверхностей идет с включением дефектов структуры более низкого порядка, требующих более высоких разрушающих напряжений [40].

При измельчении твердых частиц наблюдается их *активация* – сложный многоступенчатый процесс изменения энергетического состояния вещества. Активации способствуют также такие явления, как изменение структуры кристаллической решетки вещества, частичная аморфизация поверхности и приповерхностных слоев частиц, различные виды излучений, возникающие при разрушении, изменение вида химических связей на поверхности и в глубинных слоях вещества, электронизация и другие процессы [42].

Под действием механической нагрузки подведенная энергия расходуется на создание упругих и пластических деформаций в частицах. Пластическая деформация изменяет форму частиц, нарушает упорядоченность кристаллической решетки и образует дислокацию. Энергия пластических деформаций при сдвиге деформирующего усилия частично переходит в тепло, частично увеличивает внутреннюю энергию измельчаемых частиц. Под увеличением внутренней энергии частиц понимается увеличение той части полной внутренней энергии, которая включает в себя энергию взаимодействия микрочастиц, энергию кристаллической решетки, энергию электронных оболочек ионов и атомов, энергию микро- и макродефектов структуры материала и т.д.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В КАЛОМЕТРИЧЕСКИХ МЕЛЬНИЦАХ ПОКАЗАЛИ, ЧТО ИЗМЕЛЬЧЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ АККУМУЛИРУЮТ ЗНАЧИТЕЛЬНО БОЛЬШУЮ ЭНЕРГИЮ, ЧЕМ ТА, ЧТО ИДЕТ НА ОБРАЗОВАНИЕ НОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ [37, 43]. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ (ИНТЕНСИВНОСТИ ПОДВОДА ЭНЕРГИИ, СВОЙСТВ

ВЕЩЕСТВА, ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА И Т.Д.) АККУМУЛИРУЮТ ОТ 8 ДО 30 % ПОДВЕДЕННОЙ ЭНЕРГИИ. ЭТА ЭНЕРГИЯ ДЕЛАЕТ ТВЕРДОЕ ТЕЛО ХИМИЧЕСКИ СТОЛЬ АКТИВНЫМ, ЧТО СТАНОВИТСЯ ВОЗМОЖНЫМ ЦЕЛЫЙ РЯД ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ, КОТОРЫЕ БЫЛИ В ИНЫХ УСЛОВИЯХ НЕРЕАЛИЗУЕМЫ БЕЗ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ.

При создании напряженного состояния твердого тела часть подведенной механической энергии накапливается в нем в виде новой поверхности, линейных точечных дефектов. В свою очередь, химические свойства кристаллов определяются наличием в них дефектов, их природой и концентрацией.

С помощью механической активации изменяется структура твердых тел, ускоряются процессы диффузии при пластических деформациях, образуются активные центры на новых поверхностях как внешних, так и внутренних, возникают импульсы высоких локальных температур и давлений при продвижении трещин, эмиссия электронов высоких и средних энергий при образовании трещин и т.д. Такие явления наиболее интенсивны в процессе деформации твердых тел, особенно при высокой скорости подвода к ним энергии.

При упругопластической деформации твердых тел образуются неравновесные структурные дефекты различного типа [37, 44]: локализующиеся в пределах микроструктуры (смещенные из положения равновесия атомы, напряженные и деформированные связи, точечные дефекты и т.д.) или дислокации и макроскопические дефекты типа макротрещин и границ раздела между элементами структуры (одномерные и двумерные дефекты). На образование дефектов первого типа требуются значительные затраты энергии, однако, при повышении температуры они сравнительно быстро исчезают. Напротив, менее энергоемкие одно- и двумерные дефекты более устойчивы и играют большую роль в процессах пластического течения.

Типично двумерными дефектами являются области несогласованности в местах соприкосновения соседних зерен. Экспериментальные изменения энергии межзеренных границ дают значения  $0,1 - 1 \text{ Дж/м}^2$  в зависимости от состава и ориентировки соседних зерен, которые несколько ниже, чем значения свободной поверхности энергии для неорганических материалов ( $0,1 - 3 \text{ Дж/м}^2$ ) [38, 45]. Предельно возможное количество энергии, запасенное твердым телом, в частности при механических деформациях за счет поверхностной энергии и энергии межзеренных границ, находится на уровне теплоты плавления неорганических веществ ( $10 - 150 \text{ кДж/моль}$ ) [38].

При взаимодействии частичных дислокаций образуются дефекты упаковки и двойники, представляющие собой двумерные поверхностные дефекты. Энергия образования поверхностей, связанных с дефектами упаковки и двойниками, на  $1 - 3$  порядка ниже энергий образования поверхности, разделяющей отдельные зерна кристаллов. В напряженном состоянии кристалла при реализации пластических деформаций могут образоваться дефекты с более высокими энергиями, в частности точечные, на образование которых необходимо затратить энергию  $10^{-19} \dots 10^{-18} \text{ Дж}$ . Изменение структуры вещества при измельчении бывает, как правило, достаточно сложным и обычно анализируется различными методами: рентгеноструктурным анализом, электронной микроскопией и ядерной гамма-резонансной спектроскопией (ЯГРС) и др. [44].

К объяснению специфики *механохимических процессов* имеется в настоящее время несколько подходов. В одном из главных рассматриваются тепловые теории инициирования механохимических реакций. Согласно этим теориям, вследствие низкой теплопроводности большинства твердых тел энергия, выделяющаяся при больших скоростях деформации, приводит к образованию локальных объемов вещества с температурами выше температуры сублимации и образованию зон «магма-плазмы» [37].

Согласно В.В. Болдыреву [46], процесс распада твердого тела можно представить как определенную последовательность стадий активации, дезактивации и собственно химической реакции. В зависимости от того, какая из этих стадий преобладает, различают два крайних случая: распад обусловлен процессами возбуждения и разрыва связи (например, термическое разложение) или одной из вторичных стадий (превращения промежуточных продуктов, образовавшихся в результате первичного акта).

Второй подход к инициированию механохимических реакций заключается в развитии теории активных поверхностных состояний, представляющих собой локализованные валентности на поверхности кристалла. В литературе их часто называют разорванными или висячими связями. Число



их может быть равно числу поверхностных атомов. Скорость образования центров пропорциональна скорости образования поверхности. Механохимические процессы можно охарактеризовать энергетическим выходом, равным числу молей образовавшихся или прореагировавших частиц при затрате 1 МДж механической работы [37].

Энергетические выходы механохимических процессов лежат в очень широком диапазоне – от  $10^{-3}$  до  $10^2$  МДж/моль, что обусловлено различием в механизмах их инициирования. Наибольшие выходы характерны для твердофазных реакций и полиморфных переходов, что показывает перспективность использования механической активации для инициирования и ускорения этих процессов.

В настоящее время имеется большое число сведений о механической активации различных твердых тел. Отмечено, что механическая активация катализаторов повышает их активность в несколько раз. После активации снижаются температуры и увеличиваются скорости разложения. Энергия активации при этом снижается в два раза и более. Механическая активация резко повышает растворимость целого ряда веществ, малорастворимых до механической обработки.

Совмещение процессов тепло- и массообмена, механоактивации, измельчения частиц твердой фазы в процессе химической реакции в одном случае и сублимации в другом позволяет в несколько раз увеличить удельную объемную производительность аппаратов, существенно снизить энергозатраты и повысить качество получаемых продуктов [37].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2

- 
- 
1. Перник А.Д. Проблемы кавитации. – Л.: Судостроение, 1966. – 439 с.
  2. Пирсол И. Кавитация. – М.: Мир, 1975. – 95 с.
  3. Рождественский В.В. Кавитация. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.
  4. Левковский Ю.Л. Структура кавитационных течений. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.
  5. Арзуманов З.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М.: Энергия, 1978. – 303 с.
  6. Буйвол В.Н. Тонкие каверны в течениях с возмущениями. – Киев: Наукова думка, 1980. – 296 с.
  7. Терентьев А.Г. Математические вопросы кавитации: Учебное пособие. – Чебоксары: Издательство Чувашского гос. ун-та, 1981. – 132 с.
  8. Исследования по развитой кавитации: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1976. – 144 с.
  9. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 668 с.
  10. Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах. – Киев: Вища шк., 1984. – 68 с.
  11. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // Физическая акустика / Под ред. У. Мезона. – М.: Мир, 1967. – Т. 1, Ч. Б. – С. 7 – 138.
  12. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.
  13. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – Ч. 5. – С. 168 – 220.
  14. Маргулис М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): Учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1984. – 272 с.
  15. Акуличев В.А. Пульсации кавитационных полостей // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – Ч. 4. – С. 129 – 166.
  16. Neppiras E.A. Acoustic cavitation // Phys. Repts. – 1980. – V. 61, N 3. – P. 159 – 251.
  17. Акуличев В.А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. – М.: Наука, 1978. – 220 с.
  18. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособие для вузов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

19. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. – М.: Химия, 1986. – 288 с.
20. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
21. Немчин А.Ф. Новые технологические эффекты теплопереноса при использовании кавитации // Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 19, № 6. – С. 39 – 47.
22. Розенберг Л.Д. Кавитационная область // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – Ч. 6. – С. 221 – 266.
23. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
24. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Иностранная литература, 1957. – 726 с.
25. Бронин Ф.А., Чернов А.П. Удаление заусенцев и диспергирование порошковых материалов при воздействии ультразвука. – М.: Машиностроение, 1978. – 55 с.
26. Юдаев В.Ф. Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды // Теор. основы хим. технол. – 1994. – Т. 28, № 6. – С. 581 – 590.
27. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М.: Машиностроение, 2001. – 260 с.
28. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. – М.: Физматлит, 2001. – 240 с.
29. Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.А. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. – М.: Машиностроение, 1977. – 256 с.
30. Лепендин А.Ф. Акустика: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
31. Харкевич А.А. Избранные труды. Т. 2: Линейные и нелинейные системы. – М.: Наука, 1973. – 566 с.
32. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.
33. Богданов В.В., Христофоров Б.И., Клоцунг Б.А. Эффективные малообъемные смесители. – Л.: Химия, 1989. – 224 с.
34. Кудимов Ю.Н., Казуб В.Т., Голов Е.В. Электроразрядные процессы в жидкости и кинетика экстрагирования биологически активных компонентов. Ч. 1: Ударные волны и кавитация // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 253 – 264.
35. Физические эффекты в машиностроении: Справочник / Под ред. В.А. Лукьянца. – М.: Машиностроение, 1993. – 224 с.
36. Фабер Т.Е. Гидроаэродинамика. – М.: Постмаркет, 2001. – 560 с.
37. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. В 5 т. Т. 2: Механические и гидромеханические процессы / Под ред. А.М. Кутепова – М.: Логос, 2001. – 600 с.
38. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 306 с.
39. Механическая активация апатита и его растворимость / М.В. Чайкина, А.С. Колосов, Е.Г. Аввакумов и др. // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1978. – Вып. 2, № 4. – С. 52 – 59.
40. Ребиндер П.А. Избранные труды. Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
41. Качанов Л.Н. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 311 с.
42. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Системный анализ процессов химической технологии. Кн. 5: Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.

43. Молчанов В.И., Юсупов Т.С. Физические и химические свойства тонкодиспергированных минералов. – М.: Недра, 1981. – 157 с.

44. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Metallurgy, 1981. – 299 с.

45. Вишняков Я.Д., Фанштейн Г.Е. Превращения в металлах с различной энергией дефектов упаковки. – М.: Metallurgy, 1981. – 135 с.

**46. БОЛДЫРЕВ В.В. О КИНЕТИЧЕСКИХ ФАКТОРАХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СПЕЦИФИКУ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ // КИНЕТИКА И КАТАЛИЗ. – 1977. – Т. 18. – ВЫП. 2. – с. 350 – 358.**

**3 МАШИНЫ И АППАРАТЫ С ИМПУЛЬСНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ**

---

---

### **3.1 ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ КОЛЕБАНИЙ**

Оборудование и методы интенсификации ХТП, основанные на генерировании колебаний в обрабатываемой среде, рассматриваются как одни из перспективных [1 – 3].

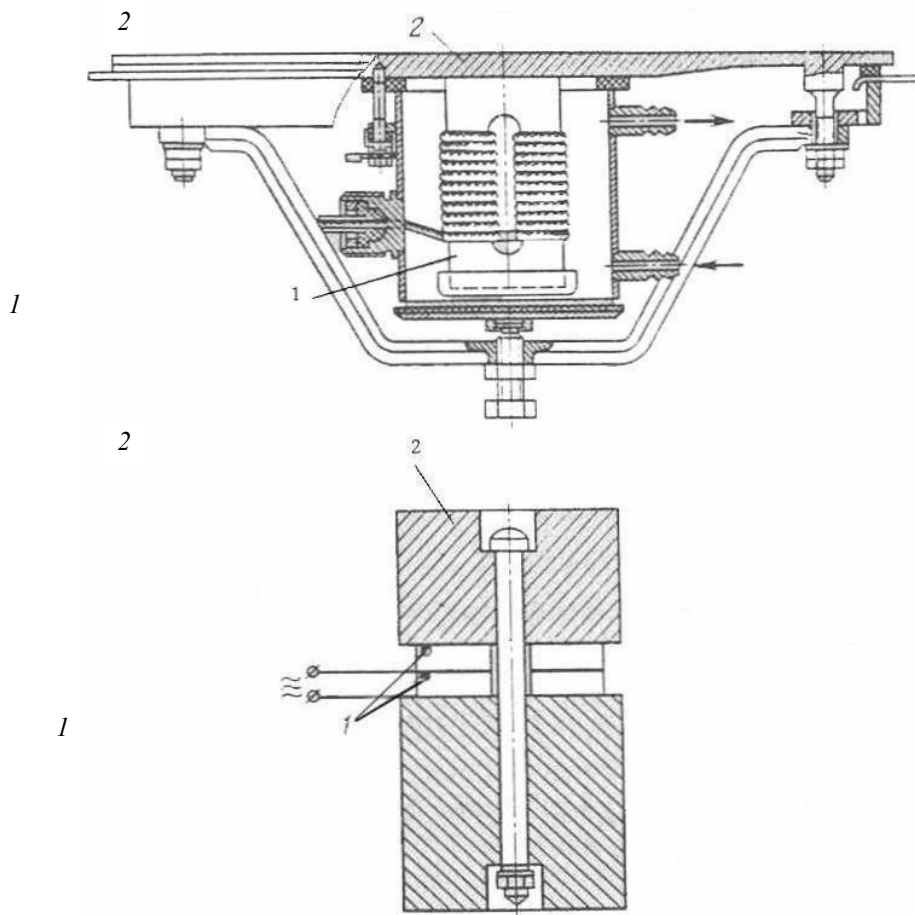
Для генерирования звуковых и ультразвуковых колебаний используют разнообразные преобразователи: гидродинамические, электродинамические, пьезоэлектрические, магнитострикционные. В ультразвуковом диапазоне наиболее распространены последние. В этих электроакустических преобразователях используется прямой магнитострикционный и пьезоэлектрический эффект в переменных магнитных и электрических полях. Диапазон частот возбуждения преобразователей является очень широким.

Ультразвуковые колебания от преобразователя передаются к обрабатываемым веществам через специальные трансформирующие и согласующие устройства (концентраторы, пластины и др.), заканчивающиеся излучающей поверхностью [1 – 4]. Общий вид двух распространенных типов ультразвуковых промышленных преобразователей показан на рис. 3.1.

**УСТАНОВКИ ТИПА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВАНН ПРЕДНАЗНАЧЕНЫ ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЗАКРЫТОЙ ЕМКОСТИ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ СООТНОШЕНИИ ЗВУКОВОГО И СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЙ. УСТАНОВКИ ПОЛУЧИЛИ ПРИМЕНЕНИЕ ВО МНОГИХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ, УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ, УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ И ДЛЯ РЯДА ДРУГИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ.**

**СХЕМА И ОБЩИЙ ВИД УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВАННЫ УЗВД-6 ПОКАЗАНЫ НА РИС. 3.2. КАМЕРА 2 ОБЪЕМОМ 800 СМ<sup>3</sup> С ГЕРМЕТИЧНОЙ КРЫШКОЙ 1 РАСПОЛОЖЕНА ВЕРТИКАЛЬНО И ЗАКРЕПЛЕНА В УЗЛЕ СМЕЩЕНИЯ КОНИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА 3. В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА КОЛЕБАНИЙ ИСПОЛЬЗУЮТ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ 4 ПМС-15А-18 МОЩНОСТЬЮ 4 КВТ С ПИТАНИЕМ ОТ ГЕНЕРАТОРА ТИПА УЗГ-10 С ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТЬЮ 20 КВТ. АМПЛИТУДА КОЛЕБАНИЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА НАХОДИТСЯ В ПРЕДЕЛАХ 10 – 15 МКМ И КОНТРОЛИРУЕТСЯ ВИБРОМЕТРОМ УВВ-4. ИЗБЫТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ ДО 10<sup>6</sup> ПА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ СЖАТЫМ ГАЗОМ.**

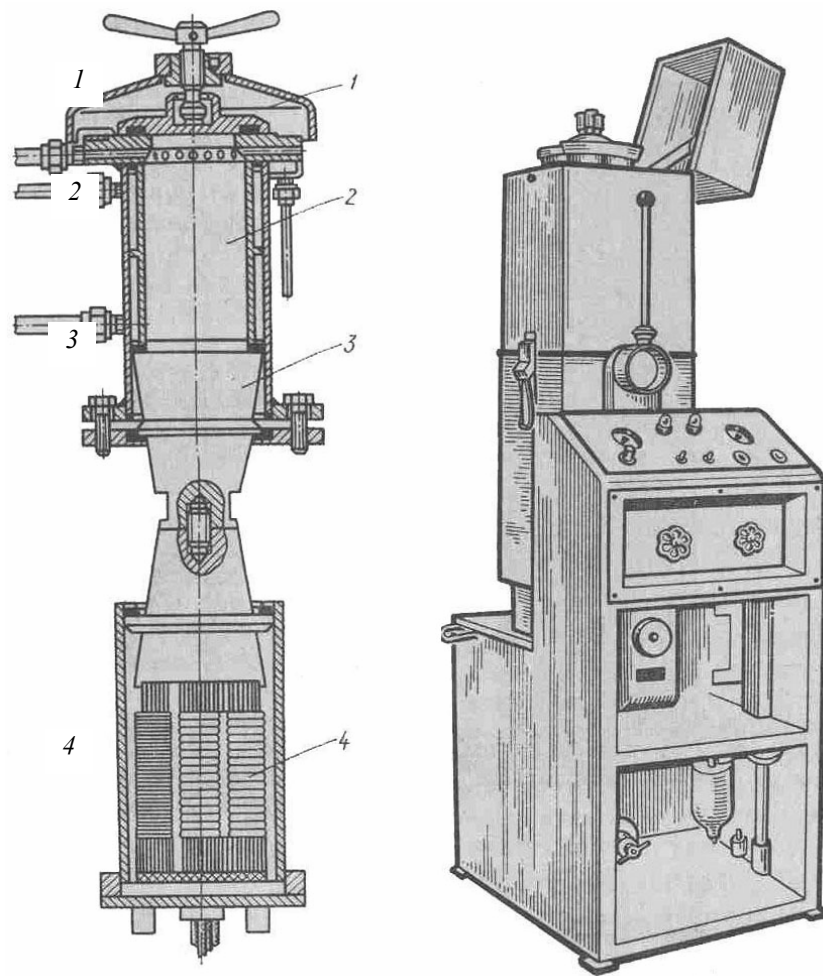
Для обработки суспензий используют также ультразвуковые аппараты типа УПХА (рис. 3.3). Основной конструктивной частью аппарата серии УПХА-Р является собранная из четырех магнитострикционных цилиндрических излучателей колонна 1, имеющая общую рубашку охлаждения 2. Металлические стаканы 4, запрессованные внутрь каждого излучателя 3,



**Рис. 3.1** Ультразвуковые промышленные преобразователи:  
 1 – сердечник; 2 – излучатель

СОЕДИНЕНЫ СВАРКОЙ И ОБРАЗУЮТ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ КАМЕРУ, В КОТОРОЙ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ОБРАБОТКА СУСПЕНЗИИ 5. СУСПЕНЗИЯ ПОДАЕТСЯ В КОЛОННУ С ЗАЩИТНОЙ ТРУБОЙ. В ЗАГРУЗОЧНОЙ ЕМКОСТИ 6 ПРЕДУСМОТРЕНА ВОЗМОЖНОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СУСПЕНЗИИ ПРОПЕЛЛЕРНОЙ МЕШАЛКОЙ. РАБОЧЕЕ ДАВЛЕНИЕ В КОЛОННЕ РЕГУЛИРУЕТСЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ПРЕДЕЛАХ ДО 1 МПА.

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ РАБОТАЮТ НА ЧАСТОТЕ 8 И 16 КГЦ. ПИТАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ

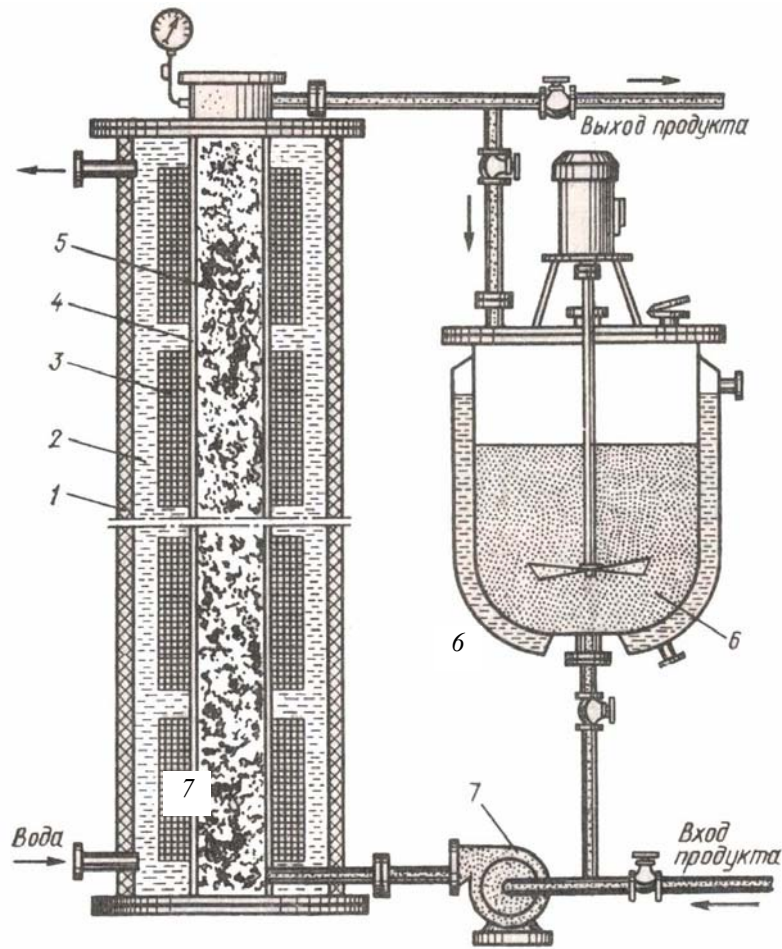


**Рис. 3.2** Схема и общий вид ультразвуковой установки УЗВД-6

**ГЕНЕРАТОРАМИ НА ЧАСТОТЕ 8 КГЦ. В СЛУЧАЕ РАБОТЫ НА ЧАСТОТЕ 16 КГЦ ИСПОЛЬЗУЮТ УДВОИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ. ПОТРЕБЛЯЕМАЯ УПХА МОЩНОСТЬ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СЕРИИ НАХОДИТСЯ В ПРЕДЕЛАХ ОТ 4 ДО 15 КВТ [1 – 4].**

Электромагнитные импульсные устройства ударного действия содержат одну или несколько обмоток 1 и 2 и якорь 4 из ферромагнитного материала, установленных в корпусе 3 (рис. 3.4). Принцип действия электромагнитных ударных машин основан на взаимодействии расположенных

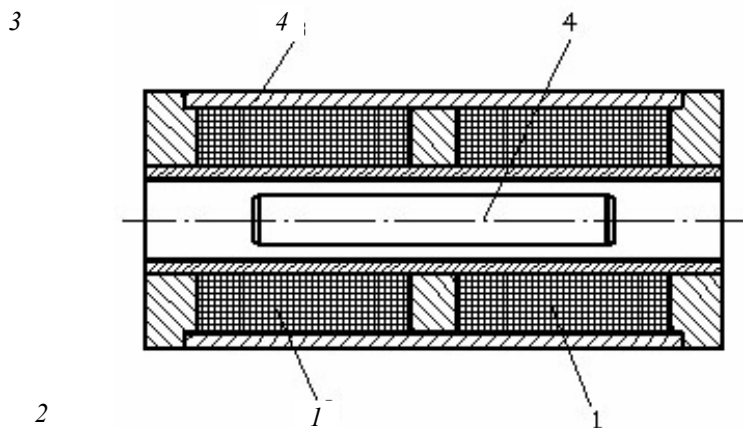
5  
4  
3  
2  
1



**Рис. 3.3** Ультразвуковой аппарат типа УПХА

на магнитопроводе обмоток, по которым пропускают импульсы тока, с подвижным ферромагнитным сердечником-якорем [1, 2]. Различают устройства длинноходовые, когда якорь передает энергию объекту только в момент удара, и короткоходовые, в которых якорь непосредственно связан с объектом.

Общей чертой импульсных электродинамических и электроразрядных устройств [1, 5 – 10] является использование накопителя электрической энергии, от которого она через коммутатор передается излучателю.



**Рис. 3.4** Схема электромагнитного импульсного устройства ударного действия

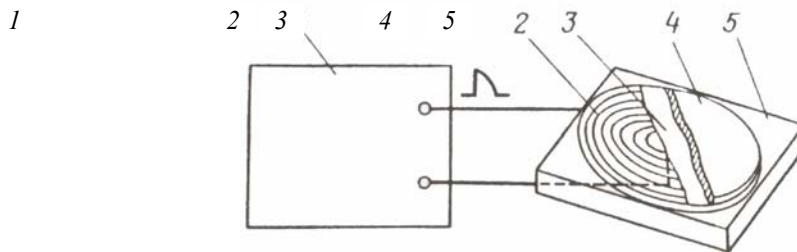


Рис. 3.5 Схема импульсного электромагнитного излучателя

В импульсном электродинамическом излучателе (рис. 3.5) при протекании импульса тока от генератора *1* через обмотку (соленоид) *2*, выполненную в виде плоской спирали, создается импульсное магнитное поле, наводящее в проводящей пластине (мембране) *4* вихревые токи. Взаимодействие поля с токами приводит к отталкиванию пластины. Для устранения электрического пробоя пластина *4* отделена от соленоида *2* тонкой изолирующей прокладкой *3* и основание *5* выполнено из изолирующего материала. Контакт мембраны с жидкостью приводит при ее импульсном движении к генерации в ней ударной волны.

Принцип действия импульсного электроразрядного излучателя основан на электрогидравлическом эффекте, заключающемся в генерации ударных волн в жидкости при ее пробое. Эффективные технические разработки применения электрического пробоя жидкостей для целей дробления и смешения были выполнены Л.А. Юткиным и другими исследователями [7 – 10]. Как правило, в качестве накопителей энергии для рассматриваемых излучателей используют специальные батареи конденсаторов, а коммутаторами служат разрядники, игнитроны, тиратроны и тиристоры [1]. Для оценок максимального давления и длительности импульса можно принять:

$$P_m \approx (3,3 \cdot 10^5 / \rho) \sqrt[3]{E} ;$$

$$t_n \approx 0,2 \cdot 10^{-6} \sqrt[3]{E} . \quad (3.1)$$

Здесь в качестве параметра энергии *E* используют ее запас на конденсаторе с учетом КПД преобразования

$$E = 0,5\eta CU^2 ,$$

где *C* – емкость конденсатора; *U* – зарядное напряжение;  $\eta$  – КПД.

Принимая форму импульса давления экспоненциальной, рассчитывают давление как

$$p = P_m \exp(-\alpha t) , \quad (3.2)$$

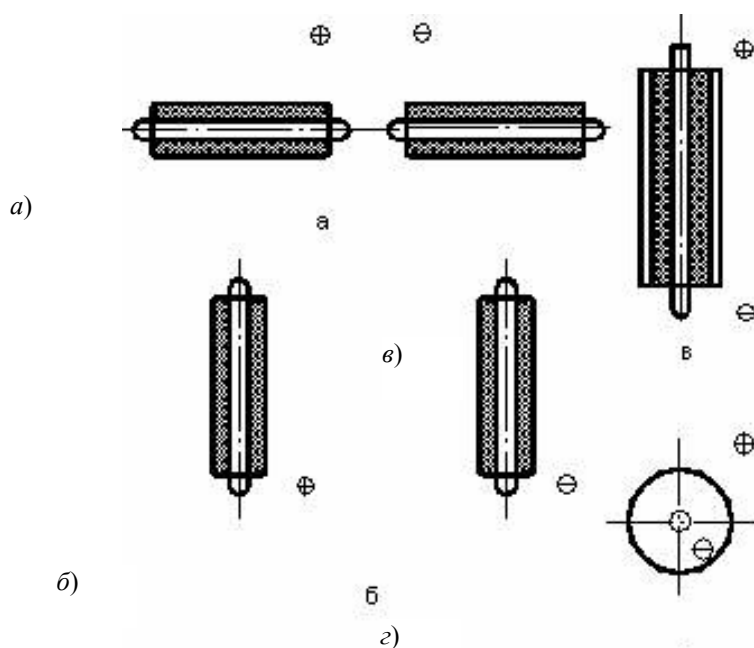
где  $\alpha$  – временной показатель затухания.

**К ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫМ АППАРАТАМ МОЖНО ПРЕДЪЯВИТЬ РЯД ОБЩИХ ТРЕБОВАНИЙ: КОНСТРУКЦИЯ АППАРАТА ДОЛЖНА ОБЕСПЕЧИВАТЬ ВЫСОКУЮ ТОЧНОСТЬ, ПРОТИВОСТОЯТЬ ИМПУЛЬСНЫМ НАГРУЗКАМ (ЭТО В РАВНОЙ МЕРЕ ОТНОСИТСЯ И К МЕМБРАНЕ ДЛЯ МЕМБРАННЫХ АППАРАТОВ); МАТЕРИАЛ АППАРАТА ДОЛЖЕН БЫТЬ ХИМИЧЕСКИ ИНЕРТЕН; С УЧЕТОМ САНИТАРНЫХ ТРЕБОВАНИЙ КОНСТРУКЦИЯ АППАРАТА ДОЛЖНА ОБЕСПЕЧИВАТЬ ВОЗМОЖНОСТЬ БЫСТРОЙ И ПОЛНОЙ ЕГО РАЗБОРКИ. КОНСТРУКЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВВОДА ДОЛЖНА ОБЕСПЕЧИВАТЬ ВОЗМОЖНОСТЬ БЫСТРОГО И ФИКСИРОВАННОГО ВАРЬИРОВАНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ (ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОЙ ЯВЛЯЕТСЯ СИСТЕМА КРЕПЛЕНИЯ, ПРИ КОТОРОЙ ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ УДАРНЫХ НАГРУЗОК ВОСПРИНИМАЕТСЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ СТЕРЖНЕМ ЭЛЕКТРОДА). ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА С ЖИДКОСТЬЮ ДОЛЖНА БЫТЬ МИНИМАЛЬНОЙ, ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОДА – ЭЛЕКТРИЧЕСКИ И МЕХАНИЧЕСКИ ПРОЧНОЙ, СИСТЕМА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРОДУКТА – ЭЛЕКТРИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ, СИСТЕМА ПОДВЕСКИ И АМОРТИЗАЦИИ ДОЛЖНА ОБЕСПЕЧИВАТЬ ГАШЕНИЕ ВИБРАЦИЙ В МИНИМАЛЬНОЕ ВРЕМЯ, СИСТЕМА ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ – ОБЛАДАТЬ ДОСТАТОЧНОЙ ВИБРОСТОЙКОСТЬЮ И**

**БЫТЬ НАДЕЖНО ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ЭКРАНИРОВАНА [10]. ПРИВЕДЕННЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ЕСТЕСТВЕННО НЕ ИСЧЕРПЫВАЕТ ВОЗМОЖНЫЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ПРОЦЕССЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ АППАРАТУРЫ.**

Одним из наиболее сложных узлов в электроимпульсной аппаратуре является система, образуемая положительным и отрицательным электродами. Конструкция электродов является определяющей для характера развития искрового канала и с этой точки зрения она – важнейшая для всего технологического аппарата в целом. Конструктивные формы электродов, с учетом электрических характеристик, предопределяются геометрией и технологической направленностью аппарата. В зависимости от взаиморасположения электродов в рабочей камере их можно разделить на следующие виды: противопоставленные, т.е. ось одного является продолжением оси другого электрода; параллельные; коаксиальные, т.е. один электрод расположен внутри другого концентрического электрода; секционные, т.е. центральный электрод окружен отдельными пластинами-секциями (рис. 3.6). Эту схему можно рассматривать, как частный случай предыдущего электрода, хотя она и имеет самостоятельное значение.

Наиболее предпочтительной является система электродов острое (+) – плоскость (–), при этом выделение энергии происходит наиболее стабильно. Отрицательный электрод, как правило, заземлен. В качестве отрицательного электрода часто используются различные детали технологического аппарата – крышки, дно, стенки и т.п.



**Рис. 3.6. Схемы установки электродов:**

*а* – противопоставленные; *б* – параллельные; *в* – коаксиальные; *г* – секционные

Наиболее быстрому разрушению подвергается изоляция электрода, непосредственно примыкающая к оголенной поверхности токоведущего стержня, поэтому именно этот участок должен обладать максимальным сопротивлением к нагрузкам. В качестве изоляции электродов используют вакуумную резину, стеклопластик, полиэтилен и в ряде электродов – различные комбинации этих материалов.

Так как в импульсных и мембранных аппаратах много общих элементов, целесообразно рассмотреть их совместно. Электроимпульсный аппарат периодического действия наиболее прост (рис. 3.7, *а*). Близкий ему по конструкции аппарат, приведенный на рис. 3.7, *в*, имеет полый электрод, что позволяет вводить обрабатываемую среду непосредственно в зону разряда, кроме того, рубашка обеспечивает термостатирование процесса. Конструкция аппарата, снабженного двумя полыми электродами, также обеспечивает подачу обрабатываемой среды в зону разряда (рис. 3.7, *г*). Аппараты, приведенные на рис. 3.7, *б*, *д*, предназначены в основном для обработки систем твердое тело – жидкость и оборудованы системой транспортировки продукта. В первом случае перемещение продукта – гравитационное: продукт после прохождения контрольной решетки попадает в приемный



бункер, откуда периодически удаляется. Во втором случае измельченный продукт из бункера удаляется шнековым транспортером.

В аппаратах с мембранами (рис. 3.8) используют, как правило, электродную систему типа электрод – электрод. Мембрана может иметь различное положение и форму. Так, горизонтальная мембрана в аппарате, приведенном на рис. 3.8, *а*, плоская и прямоугольная, а на рис. 3.8, *б* – она представляет собой цилиндрическую оболочку. Последний случай энергетически более приемлем, так как используется практически вся энергия искры, однако жесткость этой системы снижает КПД аппарата. Недостаток первого аппарата – возможность осаждения на поверхности мембраны, обращенной к электродам, пузырьков газа, препятствующих прохождению ударных волн.

Мембрану, закрепленную по периметру цилиндрического корпуса, можно расположить вертикально. Количество рабочих камер может быть от одной до четырех. Преимущество этого аппарата заключается в возможности использования основной искровой камеры для комбинации ее с рабочими камерами различного назначения (рис. 3.8, *в*).

В конструкции электроимпульсного аппарата должен учитываться важный фактор – кавитация. В случае ударных волн эффект кавитации наиболее интенсивно развивается у свободной поверхности, т.е. у границы раздела жидкость-газ, волновые сопротивления которых сильно различны

одно от другого. В аппаратах, приведенных на рис. 3.8, отражение происходит на границе раздела, закрытой второй мембраной, отделяющей обрабатываемую среду от воздуха. Однако для возникновения кавитации необходимо, чтобы толщина мембраны и характер ее закрепления были такими, чтобы время выравнивания давления было больше времени появления кавитации. Следует учитывать, что за счет жесткости заделки краев мембраны, периферия ее практически не будет участвовать в формировании кавитации. Таким образом, с увеличением жесткости мембраны объем зоны кавитации будет уменьшаться.

Магнитоимпульсные аппараты (рис. 3.9) по принципам построения аналогичны электроимпульсным. Однако они имеют некоторые специфические особенности. Аппараты этого типа можно условно разделить на три группы: аппараты для создания в жидкой среде сжимаемых усилий, аппараты для создания в жидкости растягивающих усилий и аппараты, работающие на разрыв жидкости.

В аппаратах первой группы необходимо предусмотреть напротив мембраны 2 массивную отражающую стенку 4, при этом отражение происходит в фазе с основной волной, что суммарно вызывает сжатие жидкости. Аппараты второй группы наоборот, конструируют так, чтобы жидкость напротив индуктора 3 либо не соприкасалась со стенками 1 и имела свободную поверхность, либо верхнюю крышку 5 выполняют в виде тонкой мембраны. В этом случае отражение происходит в противофазе, что обуславливает возникновение растягивающих усилий. В цилиндрическом

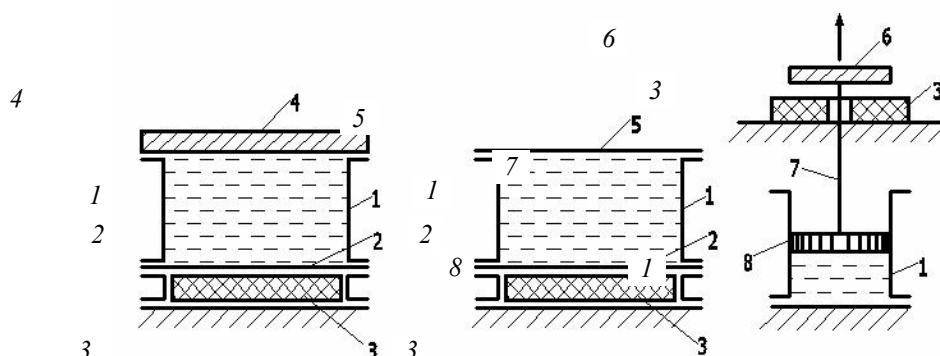


Рис. 3.9 Схемы магнитоимпульсных аппаратов

корпусе 1 аппаратов третьей группы устанавливают поршень 8, связанный штангой 7 с металлическим диском 6. При подаче электрического импульса на индуктор 3 между ним и диском возникает взаимодействие, приводящее к выталкиванию последнего и, следовательно, движению поршня вверх, что приводит к разрыву жидкости.

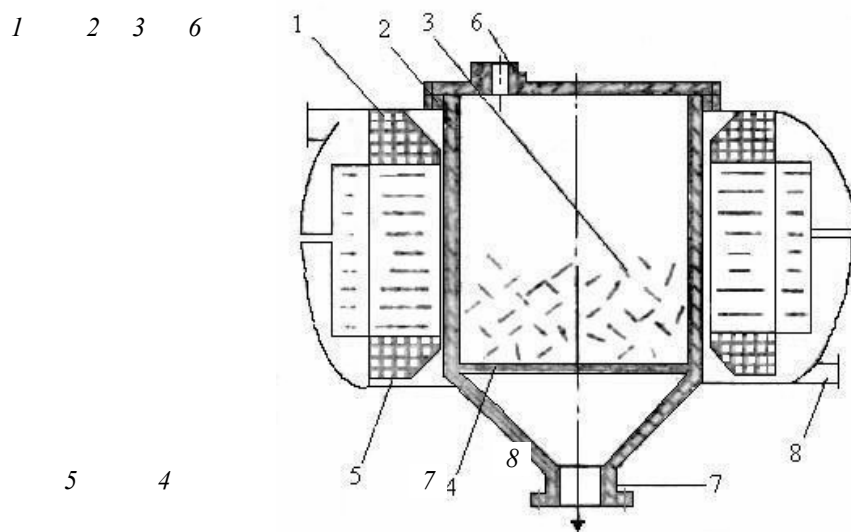
**СОПОСТАВЛЯЯ ИМПУЛЬСНЫЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ И ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛИ, МОЖНО ОТМЕТИТЬ, ЧТО ПЕРВЫЙ СОЗДАЕТ ИМПУЛЬСЫ НА ПОРЯДОК БОЛЕЕ ДЛИТЕЛЬНЫЕ, ЧЕМ ВТОРОЙ, А ЗНАЧИТ, ЕГО СПЕКТР ОГРАНИЧЕН БОЛЕЕ НИЗКИМИ ЧАСТОТАМИ. ОДНАКО ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ МОЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ БОЛЕЕ НИЗКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ДО 5 КВ ВМЕСТО 30 – 100 КВ – ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО. ПОСКОЛЬКУ ВО МНОГИХ СЛУЧАЯХ РАБОЧУЮ ОБЛАСТЬ С ЭЛЕКТРОДАМИ ТРЕБУЕТСЯ ОТДЕЛИТЬ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕМА, ТО И ПРОСТОТА ОБОИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИМЕРНО РАВНОЦЕННА. ОСНОВНАЯ СЛОЖНОСТЬ В РАЗРАБОТКАХ И ПРИМЕНЕНИИ ЭТИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ СВЯЗАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСТОЧНИКОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ (>1000 В) И НАДЕЖНОСТЬЮ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ (ЭЛЕКТРОДЫ, МЕМБРАНЫ, КОММУТАТОРЫ И Т.П.). АЛЬТЕРНАТИВНЫМ ВАРИАНТОМ ИМПУЛЬСНОМУ**

## **ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОМУ ИЗЛУЧАТЕЛЮ СЛУЖАТ СИСТЕМЫ С ВЗРЫВАЮЩИМИСЯ ПРОВОЛОЧКАМИ И СВЕТОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ УСТАНОВКИ [10].**

Использование электромагнитных полей в вихревых аппаратах является одним из способов повышения эффективности различных ХТП [11]. Повышение эффективности различных процессов в вихревом аппарате осуществляется за счет интенсивного движения ферромагнитных частиц, находящихся во вращающемся электромагнитном поле. Отличительной чертой вихревых аппаратов является высокая удельная производительность, т.е. производительность, отнесенная к единице рабочего объема.

Конструкция вихревого аппарата (рис. 3.10) состоит из источника вращающегося электромагнитного поля 1 рабочей камеры 2, неравноосных магнитных частиц 3, решетки 4, корпуса 5, патрубков входа и выхода продуктов 6, 7. Как правило, аппараты изготавливаются с системой масляного или воздушного охлаждения индуктора 8.

Данный тип аппарата находит широкое применение как для процессов с системами жидкость – жидкость, жидкость – твердое, так и для переработки сыпучих компонентов. В зависимости от осуществляемого процесса расчет индуктора выполняется из условия создания в объеме рабочей камеры индукции от 0,1 Тл до 0,2 Тл, необходимой для создания вихревого слоя ферромагнитных частиц и реализации соответствующего технологического процесса.



**РИС. 3.10. СХЕМА ВИХРЕВОГО АППАРАТА**

В силу различных причин при работе вихревого аппарата выделяется большее количество тепла. Часть этого тепла отводится сухим трансформаторным маслом, циркулирующим внутри корпуса вихревого аппарата и охлаждаемым в дальнейшем воздухом или водой. При осуществлении в аппарате процессов с жидкими средами, последние, сами нагреваясь, также отводят большое количество тепла. Таким образом, для различных процессов необходимо эффективно использовать выделяющееся тепло. Положение значительно усложняется при переработке в вихревых аппаратах термолабильных сыпучих материалов.

### **3.2. ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ КОЛЕБАНИЙ В ЖИДКОСТИ И ГАЗЕ**

#### **3.2.1. Пульсационные и вибрационные транспортирующие и перемешивающие устройства для жидкостей**

В промышленности для транспортировки жидкостей применяют разнообразные механические насосы (центробежные, поршневые, сифонные и т.п.) и в некоторых случаях – эрлифты. Любые насосы: центробежные, вихревые, ротационные, шестеренчатые, мембранные, шнековые и другие – осуществляют подачу жидкости дискретно. Дискретность подачи жидкости в насосах обусловлена конечным числом рабочих элементов. В этом случае насос является дополнительным источником гидроакустических колебаний. Спектр акустического поля дополнительного источника колебаний является сплошным, с ярко выраженными дискретными составляющими [12]. Наибольшими дискретными составляющими спектра акустического поля рабочего колеса с лопатками (дополнительного источника) являются колебания на частоте

$$f_{л} = \frac{\omega_{н} z_{н}}{2\pi}, \quad (3.3)$$

где  $\omega_{н}$  – угловая скорость рабочего колеса насоса,  $c^{-1}$ ;  $z_{н}$  – число лопаток на рабочем колесе насоса.

Более подробно процесс звукообразования в лопаточных центробежных нагнетательных машинах описан в работе [13]. Так как число лопаток на рабочем колесе имеет конкретное целое значение, то в транспортируемой жидкой или газообразной среде возникают колебания давления. «Язык» корпуса центробежного устройства (выходной патрубков), близко расположенный к наружному радиусу колеса, подвергается из-за конечного числа лопаток периодическому силовому воздействию со стороны среды, вытекающей из межлопаточных каналов. Акустические колебания, возникающие в результате такого взаимодействия, являются дискретными по своему спектральному составу и частоты  $f_{нк}$  этих дискретных составляющих связаны с параметрами центробежной нагнетательной машины соотношением:

$$f_{нк} = \frac{\omega_{н} z_{н}}{2\pi} k, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3.4)$$

**У СВОБОДНОГО ЛОПАТОЧНОГО КОЛЕСА ТАКЖЕ МОЖНО ОБНАРУЖИТЬ ДИСКРЕТНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ЧАСТОТЕ  $f_{н}$  [13].**

**РАЗРАБОТАНЫ ТАКЖЕ ПУЛЬСАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА БЕЗ ПРЯМОГО КОНТАКТА РАБОЧИХ ОРГАНОВ С ТРАНСПОРТИРУЕМОЙ СРЕДОЙ [14]. ПУЛЬСАЦИОННЫЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС (ПЦН) НЕ ИМЕЕТ ДВИЖУЩИХСЯ ЧАСТЕЙ И ПРЕДНАЗНАЧЕН ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ РАСТВОРОВ ВЯЗКОСТЬЮ ДО 50 ПА·С ПРИ НАПОРЕ ДО 7 КПА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДО 10 М<sup>3</sup>/Ч. ЕГО ПРИМЕНЯЮТ В ЭКСТРАКТОРАХ ТИПА СМЕШИТЕЛЬ-ОТСТОЙНИК, А ТАКЖЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В РЕАКТОРАХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА С ВЫСОТОЙ НАЛИВА ДО 1,5 М. ПРИ ПОДАЧЕ ВОЗДУХА В ПУЛЬСКАМЕРУ 7 (РИС. 3.11, ЛЕВАЯ СХЕМА) ЖИДКОСТЬ ВЫТЕСНЯЕТСЯ ЧЕРЕЗ НЕПОДВИЖНЫЙ СОПЛОВОЙ АППАРАТ 5, СООБЩАЮЩИЙ ЕЙ ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ. ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СИЛЫ ЖИДКОСТЬ ОТБРАСЫВАЕТСЯ В КОЛЬЦЕВОЙ КАНАЛ 4. В ЦЕНТРЕ ВИХРЯ ВОЗНИКАЕТ РАЗРЕЖЕНИЕ, ПОЭТОМУ ЖИДКОСТЬ ИЗ ВСАСЫВАЮЩЕГО ПАТРУБКА ТОЖЕ ПОСТУПАЕТ В КАНАЛ 4, ОТКУДА ОНА, СМЕШИВАЯСЬ С ЖИДКОСТЬЮ, ВЫТЕСНЕННОЙ ИЗ ПУЛЬСКАМЕРЫ, ПОПАДАЕТ В НАПОРНУЮ ПОЛОСТЬ. ПОСКОЛЬКУ ЖИДКОСТЬ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ 4 И НАПОРНОЙ ПОЛОСТИ 6 ПРОДОЛЖАЕТ ДВИГАТЬСЯ ПО ИНЕРЦИИ, ТО ВО ВРЕМЯ ВЫПУСКА ВОЗДУХА ИЗ ПУЛЬСКАМЕРЫ В ПОСЛЕДНЮЮ ПОСТУПАЕТ ЖИДКОСТЬ ИЗ ВСАСЫВАЮЩЕГО ПАТРУБКА 2. ЗАТЕМ ЦИКЛ ПОВТОРЯЕТСЯ [14].**

**ПУЛЬСАЦИОННЫЙ КЛАПАННЫЙ НАСОС (ПКН) ИМЕЕТ КЛАПАНЫ С БЕЗУДАРНОЙ ПОСАДКОЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕН ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ РАСТВОРОВ И ПУЛЬП ВЯЗКОСТЬЮ ДО 0,5 ПА·С ПРИ НАПОРЕ ДО 0,3 – 0,5 МПА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ДО 100**

м<sup>3</sup>/ч. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПКН АНАЛОГИЧЕН ПРИНЦИПУ ДЕЙСТВИЯ ПОРШНЕВОГО НАСОСА С ТОЙ РАЗНИЦЕЙ, ЧТО РОЛЬ ПОРШНЯ ВЫПОЛНЯЕТ ВОЗДУХ, УРОВЕНЬ КОТОРОГО КОЛЕБЛЕТСЯ В ПУЛЬСКАМЕРЕ 2 (РИС. 3.11, ПРАВАЯ СХЕМА).

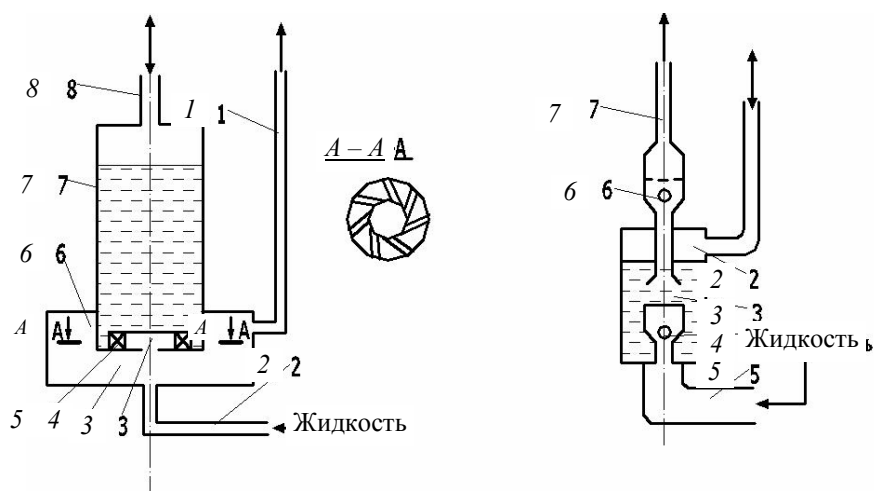


Рис. 3.11 Схемы бесконтактных пульсационных устройств

НАСОС ДОЛЖЕН БЫТЬ ПОД ЗАЛИВОМ, ЧТОБЫ ПУЛЬСКАМЕРА БЫЛА ЗАПОЛНЕНА РАСТВОРОМ ПЕРЕД НАЧАЛОМ РАБОТЫ. ПРИ ПОДАЧЕ ВОЗДУХА В ПУЛЬСКАМЕРУ 2 ВПУСКНОЙ КЛАПАН 4 ЗАКРЫВАЕТСЯ, НАПОРНЫЙ 6 ОТКРЫВАЕТСЯ, И ЖИДКОСТЬ ВЫТЕКАЕТ ЧЕРЕЗ НАПОРНЫЙ ТРУБОПРОВОД 7. ПРИ ВЫПУСКЕ ВОЗДУХА ЖИДКОСТЬ ИЗ ЕМКОСТИ ЧЕРЕЗ ВСАСЫВАЮЩИЙ ПАТРУБОК 5 И ОТКРЫТЫЙ ВПУСКНОЙ КЛАПАН 4 ЗАПОЛНЯЕТ ПУЛЬСКАМЕРУ. ДАЛЕЕ ЦИКЛ ПОВТОРЯЕТСЯ.

СИСТЕМА ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПУЛЬСАЦИИ ПОЗВОЛИЛА СОЗДАТЬ НАДЕЖНЫЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ВЫСОКОЕ КАЧЕСТВО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И НЕ ТРЕБУЮЩИЕ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ.

ПУЛЬСАЦИОННОЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО (ППУ) – ЭТО ОТДЕЛЬНЫЙ УЗЕЛ, УСТАНОВЛИВАЕМЫЙ В АППАРАТЕ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ РЕАКЦИОННОГО ОБЪЕМА. ППУ ВКЛЮЧАЕТ В СЕБЯ ТРИ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТА: 1) СОПЛОВЫЙ АППАРАТ (НЕПОДВИЖНАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕННЫМ ОБРАЗОМ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СОПЕЛ, КОТОРЫЕ СЛУЖАТ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ СТРУЙ В РЕАКЦИОННОМ ОБЪЕМЕ); 2) ПУЛЬСАЦИОННУЮ КАМЕРУ; 3) РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНУЮ ПОЛОСТЬ, СООБЩАЮЩУЮ ПУЛЬСАЦИОННУЮ КАМЕРУ С СОПЛОВЫМ АППАРАТОМ. ППУ МОЖНО РАЗДЕЛИТЬ НА ДВА ОСНОВНЫХ ТИПА: ПЕРЕКРЕСТНО-СТРУЙНЫЕ И ДИСКОВЫЕ.

ППУ ПЕРЕКРЕСТНО-СТРУЙНОГО ТИПА (РИС. 3.12, А) СОСТОИТ ИЗ КОАКСИАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ПАТРУБКА ВВОДА 1, ПУЛЬСАЦИОННОЙ КАМЕРЫ 2 И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ПОЛОСТИ 4. СОПЛА 5 ИМЕЮТ ОДИНАКОВУЮ ТАНГЕНЦИАЛЬНУЮ И РАЗЛИЧНУЮ ВЕРТИКАЛЬНУЮ ОРИЕНТАЦИЮ. ВНУТРИ ПУЛЬСКАМЕРЫ 2 УСТАНОВЛЕНА УСПОКОИТЕЛЬНАЯ РЕШЕТКА 3.

ПРИ РАБОТЕ ППУ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ПУЛЬСКАМЕРЕ ПРЕОБРАЗУЕТСЯ СОПЛАМИ В ПУЛЬСАЦИЮ СТРУЙ ЖИДКОСТИ. БЛАГОДАРЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ СОПЕЛ, ВСЯ МАССА ЖИДКОСТИ В АППАРАТЕ ПРОНИЗЫВАЕТСЯ СТРУЯМИ И ПРИВОДИТСЯ ВО ВРАЩЕНИЕ. ЖИДКОСТЬ ПОПЕРЕМЕННО ТО ВЫБРАСЫВАЕТСЯ ИЗ СОПЕЛ (ПРЯМОЙ ХОД ПУЛЬСАТОРА), ТО ЗАСАСЫВАЕТСЯ ЧЕРЕЗ НИХ В ПУЛЬСКАМЕРУ (ВЫХЛОП), ТАК ЧТО ВЕСЬ ЕЕ ОБЪЕМ МНОГОКРАТНО ПРОХОДИТ ЧЕРЕЗ ПУЛЬСКАМЕРУ, ИНТЕНСИВНОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В КОТОРОЙ ОЧЕНЬ ВЕЛИКА.

ППУ ДИСКОВОГО ТИПА (РИС. 3.12, Б) ИМЕЮТ ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНУЮ ПОЛОСТЬ, СНАБЖЕННУЮ БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ ВЕРТИКАЛЬНО (ВВЕРХ И ВНИЗ) НАПРАВЛЕННЫХ СОПЕЛ. ПРИ РАБОТЕ ППУ ВСЛЕДСТВИЕ ОДИНАКОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ГРУПП СОПЕЛ СТРУИ, СЛИВАЯСЬ, ОБРАЗУЮТ НАПРАВЛЕННЫЕ ПОТОКИ ЖИДКОСТИ. ПОТОК ОТ ВЕРХНИХ СОПЕЛ ДВИЖЕТСЯ ВВЕРХ, ЗАТЕМ, ДОСТИГНУВ ЗЕРКАЛА ЖИДКОСТИ, ОТКЛОНЯЕТСЯ К ПЕРИФЕРИИ И ЗАТЕМ НАПРАВЛЯЕТСЯ ВВЕРХ. НА УРОВНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ДИСКА ПОТОКИ СМЕШИВАЮТСЯ И ВНОВЬ ВОВЛЕКАЮТСЯ В ДВИЖЕНИЕ, ОБРАЗУЯ ДВА ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРА.

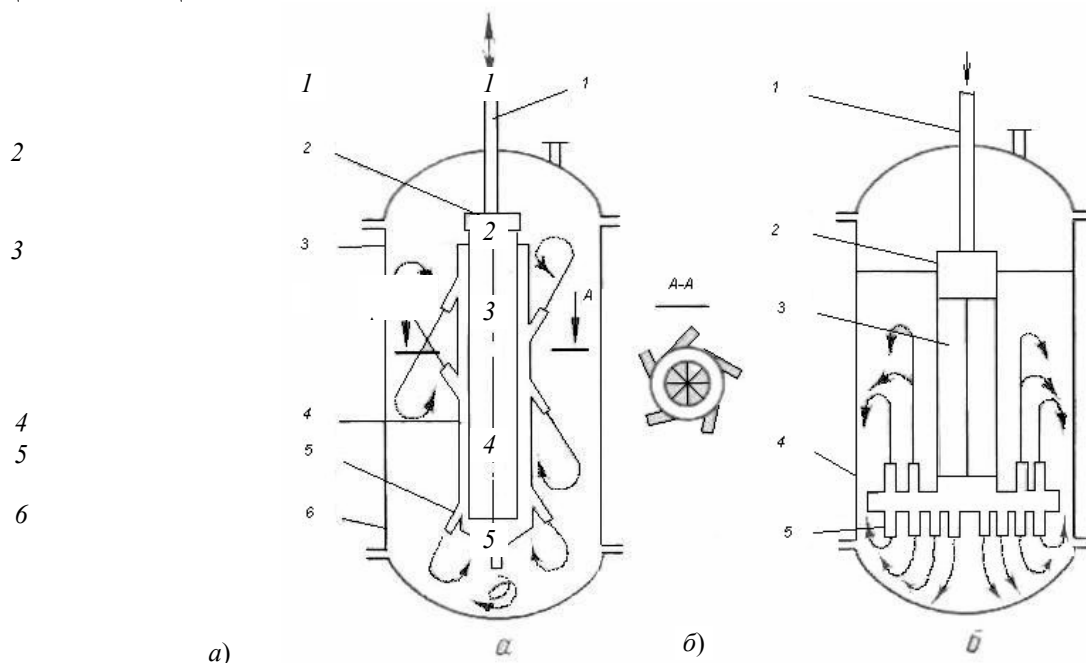


Рис. 3.12 Схемы пульсационных перемещивающих устройств

ИЗ ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТОВ НАИБОЛЕЕ ШИРОКОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОЛУЧИЛИ КОЛОННЫ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ [14]. ПУЛЬСАЦИОННЫЕ КОЛОННЫ (ПК), ПО СУЩЕСТВУ, ЯВЛЯЮТСЯ УНИВЕРСАЛЬНЫМ РЕАКТОРОМ, ТАКИМ ЖЕ, КАК БАКОВЫЕ (ОБЪЕМНЫЕ) РЕАКТОРЫ, С ТОЙ РАЗНИЦЕЙ, ЧТО В НИХ МОЖНО ОСУЩЕСТВЛЯТЬ НЕПРЕРЫВНЫЙ, В ТОМ ЧИСЛЕ И МНОГОСТАДИЙНЫЙ, ПРОЦЕСС. ВОЗМОЖНО ТАКЖЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ПЕРИОДИЧЕСКОМ ИЛИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМАХ, ОДНАКО, ПРИ ЭТОМ ТЕРЯЕТСЯ БОЛЬШАЯ ЧАСТЬ ИХ ДОСТОИНСТВ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИИ ЖИДКОСТИ РЕЗКО УЛУЧШАЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В КОЛОННАХ И ЗНАЧИТЕЛЬНО УВЕЛИЧИВАЕТ ИХ ПРЕИМУЩЕСТВО ПЕРЕД БАКОВЫМИ РЕАКТОРАМИ (В ТОМ ЧИСЛЕ И ПУЛЬСАЦИОННЫМИ).

НА ОСНОВЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ КОЛОНН СОЗДАНЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАЗНООБРАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ. КАК И ДРУГИЕ КОЛОННЫЕ АППАРАТЫ, ПУЛЬСАЦИОННЫЕ КОЛОННЫ (РИС. 3.13) СОСТОЯТ ИЗ РЕАКЦИОННОЙ 3 И ОТСТОЙНЫХ 1, 6 ЗОН.

В РЕАКЦИОННОЙ ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ НАСАДКА 4. ПУЛЬСАЦИОННЫЕ КОЛОННЫ С ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПУЛЬСАЦИИ СНАБЖЕНЫ

## **СПЕЦИАЛЬНОЙ ПУЛЬСАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ 7. ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПУЛЬСАЦИИ К КОЛОННЕ ПОДКЛЮЧАЕТСЯ ПУЛЬСАТОР.**

Пульсационные аппараты роторного типа (ПАРТ) используются для обработки таких систем как «жидкость – жидкость», «жидкость – твердое тело» и «газ – жидкость». Для каждого конкретного технологического процесса существуют определенные предпочтения в типе конструктивного и технологического оформления ПАРТ [12].

Пульсационные аппараты роторного типа различных видов и модификаций нашли применение в гидромеханических и тепломассообменных процессах за счет широкого спектра факторов воздействия:

- механическое воздействие на частицы гетерогенной среды, заключающееся в ударных, срезающих и истирающих нагрузках и контактах с рабочими частями ПАРТ;
- 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 вторичных нелинейных акустических эффектов.

Наиболее существенными и определяющими интенсивность ХТП и эффективность работы ПАРТ являются гидродинамический и гидроакустический факторы воздействия. ПАРТ, в основу работы которых положены эти факторы воздействия, относятся к классу роторных гидродинамических излучателей, которые обычно называются роторными аппаратами с модуляцией потока

(РАМП) или роторными импульсно-кавитационными аппаратами (РИКА). Последнее название наиболее точно определяет факторы воздействия на жидкую среду.

Стандартная схема ПАРТ показана на рис. 3.14. Принцип работы аппарата заключается в следующем. Обработка жидкости подается под давлением или самотеком через входной патрубок в полость ротора 1, проходит через каналы ротора 2, каналы статора 3, рабочую камеру 4 и выходит из аппарата через выходной патрубок. При вращении ротора, его каналы периодически совпадают с каналами статора. Выходя из канала статора, жидкость собирается в рабочей камере и продвигается к выходному патрубку. 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 жидкости в канале статора является переменной величиной. При распространении в канале статора импульса избыточного

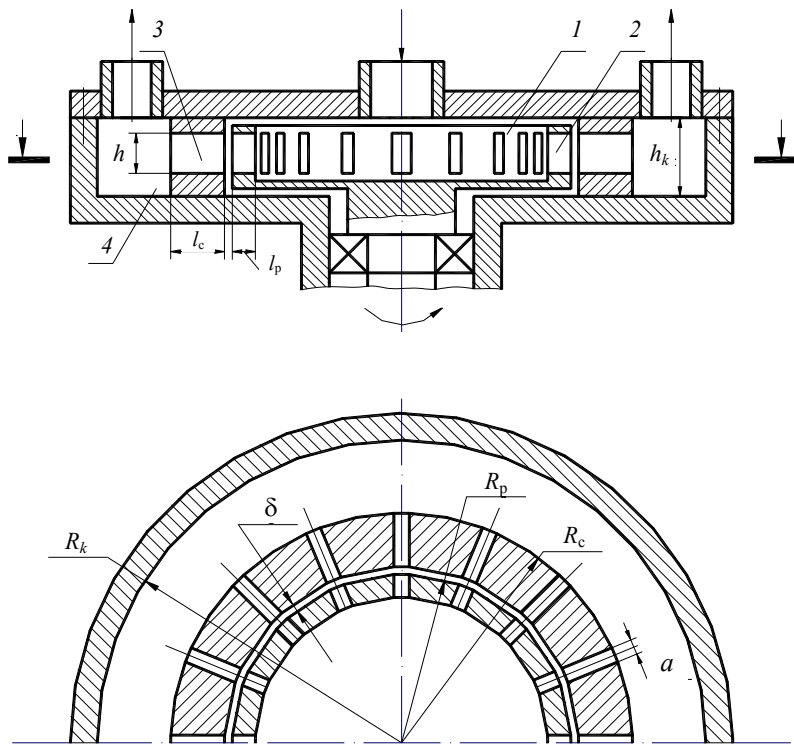


Рис. 3.14 Схема пульсационного аппарата роторного типа

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, вошедшей в канал статора, стремится к выходу из канала, и инерционные силы создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию. Кавитационные пузырьки растут при воздействии импульса пониженного давления и схлопываются или пульсируют при увеличении давления в канале статора. Часть кавитационных пузырьков выносятся в рабочую камеру.

В связи с тем, что скорость потока жидкости в канале статора велика и пульсирует, поток является турбулентным. 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 высокие срезающие и сдвиговые усилия.

**ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В КАНАЛ СТАТОРА ГЕНЕРИРУЕТСЯ ИМПУЛЬС ДАВЛЕНИЯ [12]**

$$P_{\text{ген}} = P(t) = \rho \frac{dV}{dt} \left( \frac{S_0}{2\pi} \right)^{0.5}, \quad (3.5)$$



ГДЕ  $S_0$  – ПЛОЩАДЬ СЕЧЕНИЯ КАНАЛА СТАТОРА;  $V$  – СКОРОСТЬ ПОТОКА ЖИДКОСТИ;  $\rho$  – ПЛОТНОСТЬ ЖИДКОСТИ.

СКОРОСТЬ ПОТОКА ЖИДКОСТИ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ИЗ НЕСТАЦИОНАРНОГО УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

$$\beta \left( l + \sqrt{\frac{S_0}{2\pi}} \right) \frac{dV}{dt} + \lambda(t) \frac{lV^2}{2d_3} + \xi(t) \frac{V^2}{2} + \frac{B(t)vV}{2d_3} = \frac{P_{ст}}{\rho} + \omega^2 R_p^2 - \frac{P_c}{\rho}, \quad (3.6)$$

ГДЕ  $B$  – КОЭФФИЦИЕНТ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА ЖИДКОСТИ;  $L$  – СУММАРНАЯ ДЛИНА ЗАЗОРА МЕЖДУ РОТОРОМ И СТАТОРОМ И КАНАЛОВ РОТОРА И СТАТОРА;  $V(T)$  – СРЕДНЯЯ ПО СЕЧЕНИЮ КАНАЛА СТАТОРА СКОРОСТЬ ПОТОКА ЖИДКОСТИ;  $\lambda(T)$  – КОЭФФИЦИЕНТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ;  $D_3$  – ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ДИАМЕТР КАНАЛА СТАТОРА;  $\xi(T)$  – СУММАРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ МЕСТНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ;  $B(T)$  – КОЭФФИЦИЕНТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ПОТЕРИ НАПОРА, ЛИНЕЙНО ЗАВИСЯЩИЕ ОТ СКОРОСТИ ПОТОКА;  $\nu$  – КОЭФФИЦИЕНТ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ;  $P_{ст}$  – СТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ В ПОЛОСТИ РОТОРА;  $P_c$  – ДАВЛЕНИЕ В КАМЕРЕ СТАТОРА;  $\Omega$  – УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ РОТОРА;  $R_p$  – РАДИУС ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РОТОРА.

Конструктивные особенности вибрационных аппаратов, как правило, определяются характером вибрационных колебаний, совершаемых элементами насадки [15]. В большинстве аппаратов направление вибрационных колебаний насадки совпадает с продольной (вертикальной) осью аппарата. В этом случае применяют насадку, выполненную в виде горизонтальных дисков, закрепленных на вертикальных штангах, совершающих продольные колебательные движения. Значительно реже используют вращательные колебания насадки, совершаемые вокруг продольной оси аппарата. В таких аппаратах насадку выполняют в виде вертикальных перфорированных пластин, прикрепленных к вертикальному валу. Предложены также аппараты, в которых насадка совершает колебания поперек продольной оси аппарата или под углом к ней.

В ряде конструкций вибрационных аппаратов все элементы насадки жестко связаны со штангой или валом и при работе совершают идентичные по частоте и амплитуде колебания. В других конструкциях насадка собрана в два самостоятельных пакета, совершающих колебательные движения с одинаковой частотой, но сдвинутые по фазе на половину периода, в результате чего пакеты движутся в противоположных направлениях (асинхронно). В вибрационных аппаратах, как правило, используются синусоидальные колебания насадки, реже используются трапецевидные и пилообразные колебания.

Вибрирующие перемешивающие устройства применяют как в колонных аппаратах, где стремятся создать гидродинамический режим, приближающийся к идеальному вытеснению, так и в емкостных аппаратах, где гидродинамический режим приближается к идеальному смешению [15].

Конструкция аппаратов, в которых насадка совершает продольные синхронные колебания, наиболее проста. В корпус аппарата входит шток приводного механизма, к которому прикреплены диски насадки. Вертикальные перемещения штока влекут за собой синхронные перемещение всего пакета насадки.

С целью интенсификации массообмена и уменьшения энергозатрат на создание колебаний насадки предложено несколько конструкций вибрационных аппаратов, у которых насадка разбита на два пакета, и каждый пакет относительно другого совершает колебательные движения, смещенные на половину периода. Так, в конструкции И.Я. Пономаренко, И.Т. Поколенко и Я. Прохазки в цилиндрическом корпусе аппарата помещены две вертикальные штанги, на которых в чередующейся последовательности закреплены горизонтальные перфорированные диски (рис. 3.15, левая схема).

На рис. 3.15 (средняя схема) приведена схема устройства вибрационной колонны Я. Прохазки. При работе аппарата штанги 9 и 10 движутся в вертикальном направлении, в противоположные стороны, благодаря чему соседние диски 8 и 15 насадки также движутся в противоположные стороны вдоль вертикальной оси аппарата.

Такое движение соседних дисков насадки в противоположные стороны создает зоны сжатия и разрежения жидкой рабочей среды, активизирует взаимодействие среды и насадки, попеременно увеличивая и уменьшая скорости прохождения среды через отверстия в ее дисках. Все это ведет к усиле-

нию процессов диспергирования и перемешивания взаимодействующих фаз и таким образом интенсифицирует массообмен.

В конструкции вибрационного аппарата, предложенной С.М. Григорьевым (рис. 3.15, правая схема), одна штанга 4 выполнена в виде короткой трубы, а другая 2 – в виде длинного штока, пропущенного сквозь трубчатую штангу 4. Пакет дисков 5, закрепленных на трубчатой

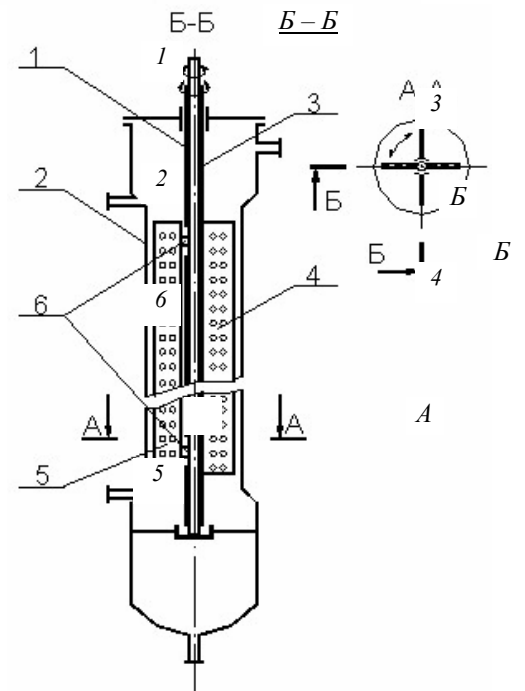
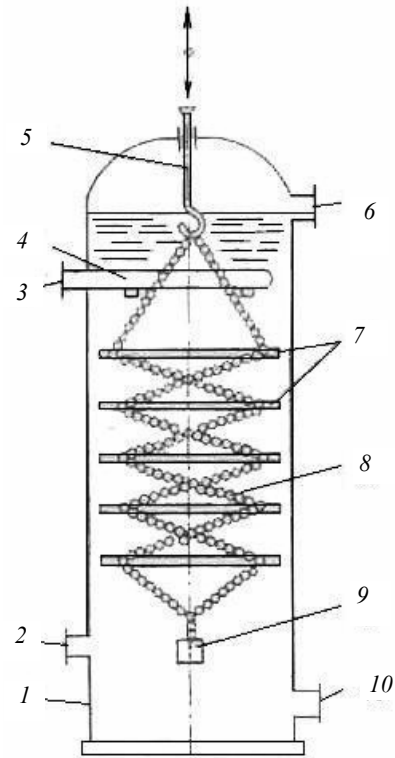
штанге, расположен над пакетом дисков 3, закрепленных на целиковой штанге. При работе аппарата оба пакета совершают возвратно-поступательные движения, также сдвинутые относительно друг друга по фазе на 180 градусов. Известен также аппарат со встречным движением дисков насадки, в котором диски на штангах крепятся группами.

К числу достоинств аппаратов с асинхронным движением элементов насадки следует отнести: снижение расхода энергии на создание колебаний насадки (когда идет подъем одного пакета, второй опускается вниз, отдавая приводу часть энергии, затраченной ранее на подъем) и уменьшение

механических нагрузок на фундамент, корпус и привод аппарата (рис. 3.16). В качестве недостатка следует отметить большую сложность конструкции.

Стремление интенсифицировать массообмен путем уменьшения продольного перемещения и активизации поперечного перемещения фаз привело к разработке ряда конструкций вибрационных аппаратов, в

**Рис. 3.16. Вибрационный аппарат с асинхронным движением насадки:**  
 1 – корпус; 2, 6 – входной и выходной патрубки для легкой жидкости; 3, 10 – входной и выходной патрубки для тяжелой жидкости; 4 – распределитель; 5 – тяга; 7 – насадка; 8 – гибкие элементы; 9 – груз



**Рис. 3.17 Схема вибрационного аппарата с горизонтально колеблющимися пластинами:**  
 1, 3 – валы; 2 – корпус; 4, 5 – пластины; 6 – крепление пластин

которых насадка одновременно с перемещениями в продольном направлении совершает перемещения и в поперечном направлении.

С указанной целью разработаны также аппараты, в которых насадка, выполненная в виде вертикальных перфорированных пластин, совершает колебания в горизонтальной плоскости (рис. 3.17).

Гельпериным Н.И. предложен аппарат, конструкция которого позволяет создавать асинхронные колебания дисков насадки в направлении, наклонном к продольной оси корпуса. Если в корпусе аппарата установить несколько вертикальных перфорированных пластин и заставить их совершать колебания в горизонтальной плоскости, то такой аппарат будет обладать большой производительностью и высокой эффективностью. Высокая производительность объясняется большим свободным сечением такого аппарата, которое может достигать 90 % и более. Высокая эффективность достигается за счет того, что струи рабочих сред, возникающие при колебаниях перфорированных пластин, направлены в горизонтальной плоскости. Это позволяет активизировать поперечное и снизить продольное перемещение (рис. 3.17).

В емкостных аппаратах, снабженных вибрирующими перемешивающими устройствами (рис. 3.18), удается получать гидродинамический режим, близкий к идеальному смешению. Поэтому они являются весьма перспективными для проведения в промышленном масштабе процессов растворения, выщелачивания, эмульгирования, перемешивания, фильтрования, а также для экстракционных, сорбционных, ионообменных и других процессов.

По сравнению с вращающимися мешалками, вибрационные мешалки имеют преимущество в том, что они создают активное перемешивание в вертикальном направлении без образования воронки на поверхности жидкости. Время, необходимое для растворения, гомогенизации или диспергирования, при вибрационном перемешивании

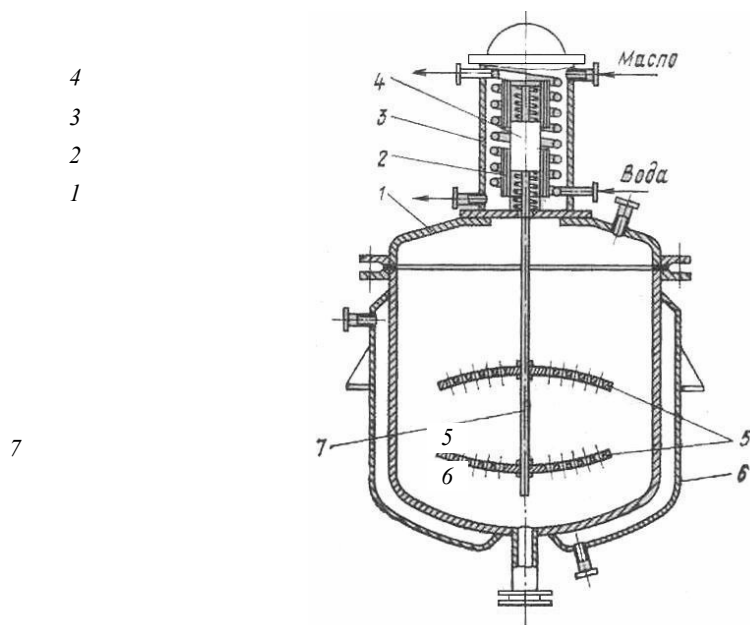


Рис. 3.18 Емкостной аппарат

с вибрирующим перемешивающим устройством:

1 – корпус; 2 – соленоидные катушки; 3 – кожух; 4 – магнитный сердечник;

5 – перфорированные диски; 6 – рубашка; 7 – штанга

существенно сокращается. Поверхность перемешиваемой жидкости даже при больших амплитудах колебаний остается спокойной и ровной, не происходит ни разбрызгивания, ни повышенного испарения с поверхности.

Вибрационные мешалки бывают одно- и многодисковые [15]. В свою очередь многодисковые имеют синхронное и асинхронное движение вибрирующих дисков.

### 3.2.2 Резонансные и автоколебательные системы для жидкостей

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ-ИЗЛУЧАТЕЛИ СЛУЖАТ ДЛЯ ПРЕВРАЩЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СТРУИ В ЭНЕРГИЮ УПРУГИХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ. ГЕНЕРАЦИЯ ЗВУКА ПРОИСХОДИТ В ОБЛАСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ СТРУИ [3].

ПО СВОЕЙ КОНСТРУКЦИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ПРИНЦИП ОБРАЗОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ МОЖНО РАЗДЕЛИТЬ НА ОПРЕДЕЛЕННЫЕ ГРУППЫ. К ПЕРВОЙ ГРУППЕ ОТНОСЯТ ИЗЛУЧАТЕЛИ, В КОТОРЫХ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ РЕЗОНИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВИДЕ ПЛАСТИН, СТЕРЖНЕЙ ИЛИ МЕМБРАН НАБЕГАЮЩЕЙ СТРУЕЙ ЖИДКОСТИ. В СВОЮ ОЧЕРЕДЬ, КОЛЕБАНИЯ РЕЗОНИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СОЗДАЮТ АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧАТЕЛЯ. НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННОЙ МОДИФИКАЦИЕЙ ТАКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ЯВЛЯЮТСЯ ПЛАСТИНЧАТЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ С КОНСОЛЬНЫМ ИЛИ ДВУХТОЧЕЧНЫМ КРЕПЛЕНИЕМ ВИБРИРУЮЩЕЙ ПЛАСТИНЫ, КАК ЭТО ПОКАЗАНО НА РИС. 3.19, А, Б. СТРУЯ, ВЫТЕКАЮЩАЯ С БОЛЬШОЙ СКОРОСТЬЮ ИЗ КОНУСНО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЛИ ЩЕЛЕВОГО СОПЛА, ПОПАДАЕТ НА ПЛАСТИНУ С КЛИНОВИДНЫМ КРАЕМ. ПРИ ЭТОМ ПРОИСХОДИТ СРЫВ СТРУИ И ВОЗНИКАЮТ ВИХРЕВЫЕ ПУЛЬСАЦИИ. ПРИ СОВПАДЕНИИ ЧАСТОТЫ ПУЛЬСАЦИИ С СОБСТВЕННОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТОЙ ПЛАСТИНЫ ОТ НЕЕ В ЖИДКОСТЬ ИСХОДИТ АКУСТИЧЕСКАЯ ВОЛНА. ТОЧКИ КРЕПЛЕНИЯ ПЛАСТИН СООТВЕТСТВУЮТ УЗЛАМ СМЕЩЕНИЯ.

АНАЛОГИЧНЫЙ ПРИНЦИП ПРЕВРАЩЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СТРУИ В ЭНЕРГИЮ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ИСПОЛЬЗУЮТ В МНОГОСТЕРЖНЕВЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЯХ (РИС. 3.19, В). СТРУЯ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ, ВЫТЕКАЮЩАЯ ИЗ СОПЛА, УДАРЕТСЯ В ЛУНКООБРАЗНЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬ И ВЕЕРООБРАЗНО РАСХОДИТСЯ, ПОПАДАЯ НА ЗАОСТРЕННЫЕ ВЫСТУПЫ СТЕРЖНЕЙ, ЗАКРЕПЛЕННЫХ ПО ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНО ОСИ СОПЛА, КАК ПОКАЗАНО НА РИСУНКЕ. ПРОИСХОДИТ ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЕЙ, КОТОРЫЕ СОЗДАЮТ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ ДОСТАТОЧНО МОЩНОЕ ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ [1 – 3].

ОРИЕНТИРОВОЧНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТАКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДИТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ ФОРМУЛАМ. ЧАСТОТА СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТРУИ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ КАК

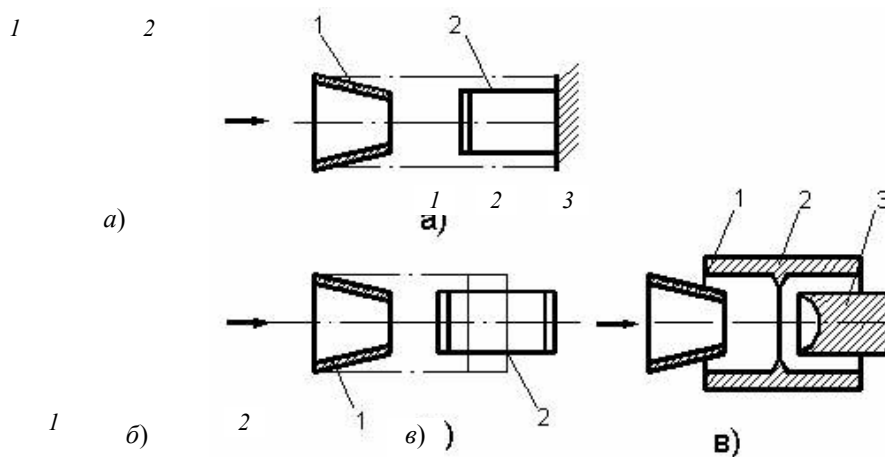


РИС. 3.19 СХЕМЫ ПЛАСТИНЧАТЫХ И МНОГОСТЕРЖНЕВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

$$f = \frac{kV}{2l}, \quad (3.7)$$

ГДЕ  $V$  – СКОРОСТЬ СТРУИ;  $l$  – РАССТОЯНИЕ ОТ СОПЛА ДО ОТРАЖАТЕЛЯ;  $k = 1, 2, 3, \dots$ .

СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ КОНСОЛЬНО ЗАКРЕПЛЕННОЙ И ЗАКРЕПЛЕННОЙ В ДВУХ УЗЛОВЫХ ТОЧКАХ ПЛАСТИН СООТВЕТСТВУЮТ ВЫРАЖЕНИЯМ

$$f = 0,162 \frac{d}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad (3.8)$$

$$f = 10^4 \frac{1}{2\pi} (1 + \gamma)^2 \frac{d/2}{(l/2)^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}}, \quad (3.9)$$

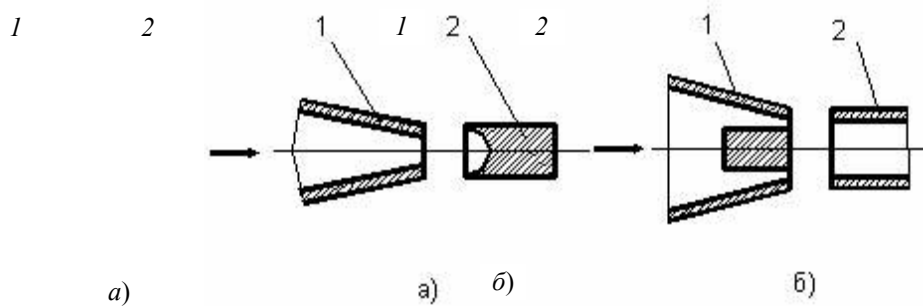
ГДЕ  $l$  – ДЛИНА ПЛАСТИН;  $d$  – ТОЛЩИНА;  $E$  – МОДУЛЬ ЮНГА;  $\rho$  – ПЛОТНОСТЬ;  $\gamma = 2d/(l - 2d)$ .

ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ДОБИВАЮТСЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПОДГОНОКой РАЗМЕРОВ РЕЗОНИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ, РЕГУЛИРОВКОЙ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ СОПЛОМ И ОТРАЖАТЕЛЕМ И СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ СТРУИ. ОСНОВНЫМ ИХ НЕДОСТАТКОМ ЯВЛЯЕТСЯ ДОВОЛЬНО БЫСТРЫЙ ВЫХОД ИЗ СТРОЯ РЕЗОНИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК, СОИЗМЕРИМЫХ С ПРЕДЕЛОМ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА.

В ДРУГОЙ ГРУППЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ СОЗДАЕТСЯ ЗА СЧЕТ ПУЛЬСАЦИИ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ. В ЭТИХ КОНСТРУКЦИЯХ РАБОЧИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ СЛУЖАТ СОПЛО И ОТРАЖАТЕЛЬ [3, 12]. ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНУСНО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СОПЛА И ОТРАЖАТЕЛЯ С ЛУНККОЙ, БЛИЗКОЙ ПО ФОРМЕ К ПАРАБОЛОИДУ ВРАЩЕНИЯ, КАК ПОКАЗАНО НА РИС. 3.20, А, МЕЖДУ ТОРЦАМИ СОПЛА И ОТРАЖАТЕЛЯ ФОРМИРУЕТСЯ ПУЛЬСИРУЮЩАЯ КАВИТАЦИОННАЯ ОБЛАСТЬ, ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ ПАРАМЕТРЫ ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ.

ОПТИМАЛЬНЫЙ УГОЛ ОТХОДА ДЛЯ ОТРАЖЕННОЙ СТРУИ ЛЕЖИТ В ПРЕДЕЛАХ  $35 - 40^\circ$ , ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА СОПЛА РАВНО 3 – 4, ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН ПОЛУЧАЕМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАХОДИТСЯ В ИНТЕРВАЛЕ 0,4 – 40 КГЦ С РЕЗКИМ АМПЛИТУДНЫМ МАКСИМУМОМ ВБЛИЗИ 1 КГЦ. МАКСИМУМ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДОСТИГАЕТ 2 – 4,5 МПА ПРИ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ СТРУИ НЕ МЕНЕЕ 20 М/С. ПРИ ЭТОМ КПД ИЗЛУЧАТЕЛЯ (ОТНОШЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ К КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СТРУИ) СОСТАВЛЯЕТ 8 – 11 %. УВЕЛИЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ НЕСКОЛЬКО ПОВЫШАЕТ ЗНАЧЕНИЕ СОЗДАВАЕМОГО ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ. ОДНАКО, ПРИ ПРЕВЫШЕНИИ НЕКОТОРОГО КРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ, НАПРИМЕР  $P_{кр} = 2 \cdot 10^5$  ПА ПРИ СКОРОСТИ СТРУИ ВОДЫ  $V = 44,8$  М/С, КАВИТАЦИЯ ПОДАВЛЯЕТСЯ, И ИЗЛУЧАТЕЛЬ ПЕРЕСТАЕТ РАБОТАТЬ. ПОВЫШЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ТРЕБУЕТ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ СТРУИ. ТАК, ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИДЕНТИЧНЫХ КАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ВОДЫ СКОРОСТЬ ПОТОКА  $V = 30$  М/С, ДЛЯ ВЕРЕТЕННОГО МАСЛА  $V = 46$  М/С.

ДРУГИМ ВАРИАНТОМ ДАННОГО ТИПА ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ЯВЛЯЕТСЯ КОНСТРУКЦИЯ, ПРИВЕДЕННАЯ НА РИС. 3.20, Б. В НЕЙ КАВИТАЦИОННАЯ ОБЛАСТЬ ТОРОИДАЛЬНОГО ВИДА ПЕРИОДИЧЕСКИ ОБРАЗУЕТСЯ МЕЖДУ КРУГЛЫМ ЩЕЛЕВЫМ СОПЛОМ И ОТРАЖАТЕЛЕМ В ВИДЕ ЦИЛИНДРА И СРЫВАЕТСЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЯ СТРУИ. В ДАННОМ СЛУЧАЕ ХАРАКТЕР КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ ПОЛНОСТЬЮ СООТВЕТСТВУЕТ ВОЗНИКНОВЕНИЮ КАВИТАЦИИ ПРИ НАТЕКАНИИ СТРУИ НА ПЛОХО ОБТЕКАЕМОЕ ТЕЛО.



**Рис. 3.20 Схемы сопловых излучателей**

Суперкавитирующие (СК) гидродинамические аппараты по принципу работы можно разделить на динамические – с вращающимися (подвижными) рабочими органами, в основном лопастными; статические – с неподвижными рабочими органами; струйные – со струйными кавитаторами; комбинированные – состоящие из различных комбинаций первых трех типов [16].

К динамическим СК-аппаратам можно отнести следующие:

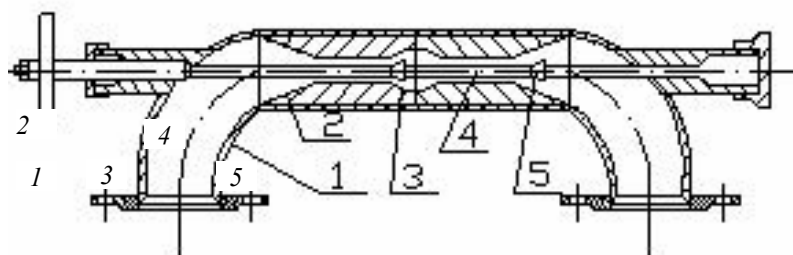
- СК-насосы, служащие для перекачивания и одновременной обработки жидких сред, причем они могут быть различных типов – осевые, диагональные и центробежные;
- СК-турбины, применяемые для кавитационной обработки жидких сред в трубопроводах за счет использования энергии технологических потоков;
- СК-мешалки, служащие для кавитационно-кумулятивной обработки жидкостей в объеме жидкости. Рабочие органы СК-мешалок подобны колесам СК-насосов.

Динамические СК-аппараты могут применяться в любых технологических схемах непрерывного и периодического или полунепрерывного действия. Например, их можно использовать как самостоятельные технологические аппараты, непрерывно перекачивая обрабатываемую среду в циркуляционном контуре реакторов, т.е. многократно подвергая среду кавитационной обработке при заданных условиях, либо в качестве соединительных перекачивающих ячеек в технологической цепочки из различных аппаратов и т.д.

К статическим СК-аппаратам относятся:

- СК-статические смесители, неподвижно устанавливаемые в трубопроводах или циркуляционных контурах за центробежными насосами и использующие энергию технологических потоков. Конструкция их рабочих органов близка к конструкции колес осевых СК-насосов;
- СК-аппараты с осесимметричными кавитаторами в виде дисков, конусов, различных тел вращения и т.д. Рабочие органы таких аппаратов устанавливаются в специально спрофилированных проточных участках;
- аппараты, состоящие из комбинации первых двух типов или имеющие неподвижные рабочие органы, которые можно перемещать для регулирования режима работы, либо которые сами могут перемещаться в режиме авторегулирования.

Струйные СК-аппараты могут быть статическими, рабочими органами которых являются неподвижно установленные против основного потока сопла; динамическими, с вращающимися навстречу основному



**Рис. 3.21 Суперкавитирующий гидродинамический аппарат**

круговому потоку соплами; пульсационно-струйными, в которых может пульсировать как основной поток, так и поток струйного кавитатора.

В качестве примера рассмотрим СК-аппарат, показанный на рис. 3.21.

Он состоит из цилиндрических участков 1 входа и выхода жидкости, цилиндрического профилированного конфузора 2 и диффузора 3, центрального штока 4, на котором укреплены кавитаторы-конусы 5. Последние могут перемещаться в диффузоре и тем самым изменять гидродинамическую обстановку в СК-аппарате [16].

### 3.2.3 Резонансные и автоколебательные системы для газа

В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ, ОТЛИЧАЮЩЕЙСЯ МАЛЫМ АКУСТИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ, СОЗДАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ, ДОСТАТОЧНОЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ВОЗМОЖНО ЛИШЬ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ ВЫСОКИХ ЗНАЧЕНИЙ АМПЛИТУДЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ [3]. В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНИКЕ ГЕНЕРАЦИЯ МОЩНЫХ КОЛЕБАНИЙ СОЗДАЕТСЯ В ИСТЕКАЮЩЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ГАЗОВОЙ СТРУИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ, КОТОРЫЕ РАБОТАЮТ В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ, – СВИСТКИ ИЛИ С МЕХАНИЧЕСКИМ ПРЕРЫВАТЕЛЕМ ПОТОКА – СИРЕНА. В ОБОИХ СЛУЧАЯХ ЧАСТЬ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СТРУИ ПЕРЕХОДИТ В АКУСТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ КОЛЕБАНИЙ СРЕДЫ.

В СВИСТКАХ ГЕНЕРАЦИЯ КОЛЕБАНИЙ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ СТРУИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УСЛОВИЙ ЕЕ ИСТЕЧЕНИЯ. В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНСТРУКЦИИ СВИСТКИ ПОДРАЗДЕЛЯЮТСЯ НА НЕСКОЛЬКО ТИПОВ, СХЕМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ КОТОРЫХ ДАНО НА РИС. 3.22.

В ВИХРЕВОМ СВИСТКЕ СТРУЯ ГАЗА ПОД ДАВЛЕНИЕМ ТАНГЕНЦИАЛЬНО ВВОДИТСЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ КАМЕРУ (РИС. 3.22, А), ГДЕ ПОТОК ЗАКРУЧИВАЕТСЯ И ПОСТУПАЕТ В ВЫХОДНУЮ ТРУБКУ, ОСЕСИММЕТРИЧНУЮ КАМЕРЕ. ПОСКОЛЬКУ ИНТЕНСИВНОСТЬ ВИХРЯ В ТРУБКЕ РЕЗКО ВОЗРАСТАЕТ ИЗ-ЗА ПЕРЕПАДА ДИАМЕТРОВ, ДАВЛЕНИЕ НА ОСИ СТАНОВИТСЯ МЕНЬШЕ АТМОСФЕРНОГО. ПОЭТОМУ

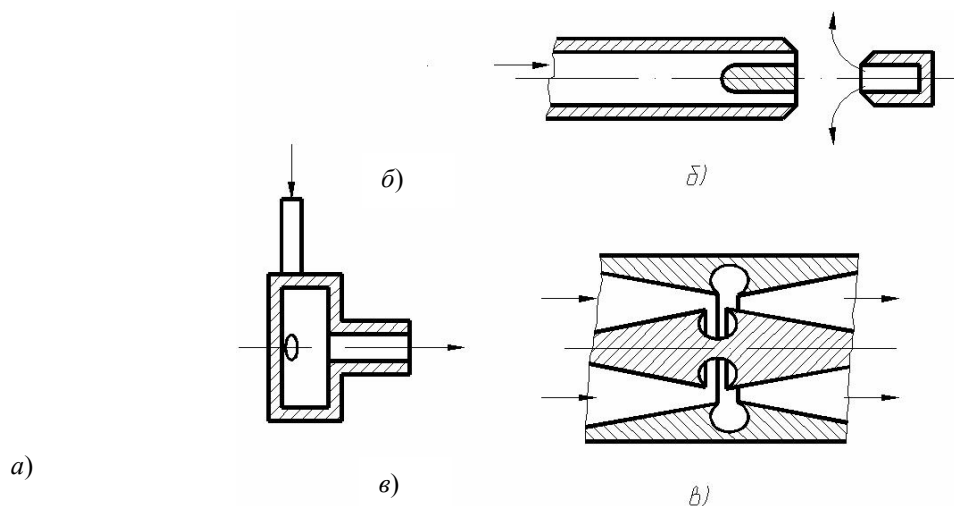


Рис. 3.22 Схемы свистковых излучателей

ОБРАЗУЕТСЯ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ПРОСКОК ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ В ТРУБКУ, Т.Е. ПУЛЬСАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ. ЧАСТОТА ПУЛЬСАЦИИ  $f$  ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ПО ФОРМУЛЕ

$$f = \frac{\alpha c}{\pi d} \sqrt{\frac{\Delta P}{P}}, \quad (3.10)$$



ГДЕ  $\alpha$  – КОЭФФИЦИЕНТ, УЧИТЫВАЮЩИЙ СНИЖЕНИЕ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ИЗ-ЗА ТРЕНИЯ;  $c$  – СКОРОСТЬ ЗВУКА;  $d$  – ДИАМЕТР КАМЕРЫ;  $\Delta P$  – ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ НА ВХОДЕ И ВЫХОДЕ ИЗЛУЧАТЕЛЯ;  $P$  – ДАВЛЕНИЕ НА ВЫХОДЕ. ВИХРЕВЫЕ СВИСТКИ КОНСТРУКТИВНО ПРОСТЫ, ОДНАКО ИХ МОЩНОСТЬ НЕ ПРЕВЫШАЕТ НЕКОЛЬКИХ ВАТТ ПРИ ЧАСТОТЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ДО 30 КГЦ. КПД ВИХРЕВЫХ СВИСТКОВ, Т.Е. ОТНОШЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ К МОЩНОСТИ СТРУИ, ДОСТИГАЕТ 28 %.

СВИСТОК ГАЛЬТОНА (РИС. 3.22, Б) СОСТОИТ ИЗ СОПЛА В ВИДЕ УЗКОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЩЕЛИ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА СО СПЛОШНЫМ ДНОМ И ОСТРЫМИ КРОМКАМИ, НАПРАВЛЕННЫМИ К СОПЛУ. В НАТЕКАЮЩЕЙ НА КЛИН СТРУЕ ОБРАЗУЮТСЯ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВИХРИ С ЧАСТОТОЙ ПУЛЬСАЦИЙ

$$f = 0,466k \frac{V}{l}, \quad (3.11)$$

ГДЕ  $V$  – СКОРОСТЬ СТРУИ ГАЗА;  $l$  – РАССТОЯНИЕ ОТ ЩЕЛИ ДО КЛИНА;  $k=1, 2, 3, \dots$

КАК ПРАВИЛО, РЕЗОНАТОРНОЙ ПОЛОСТЬЮ УСИЛИВАЮТ ПЕРВУЮ ГАРМОНИКУ, ПРИЧЕМ ЧАСТОТА ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО ПО ПРИНЦИПУ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАПОЛНЕНИЯ И РАЗГРУЗКИ ГАЗОМ, ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ВЫРАЖЕНИЕМ

$$f = \frac{c}{4}(h+L), \quad (3.12)$$

ГДЕ  $L$  – РАЗМЕРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ, ЗАВИСЯЩИЙ ОТ ДАВЛЕНИЯ НА ВХОДЕ. ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДАВЛЕНИЯ ОТ  $0,3 \cdot 10^5$  ДО  $4 \cdot 10^4$  ПА  $L$  МЕНЯЕТСЯ ОТ 0,73 ДО 0,47 М. ПРИ РАБОТЕ НА ВОЗДУХЕ СВИСТКИ ГАЛЬТОНА ИМЕЮТ МОЩНОСТЬ НЕКОЛЬКО ВАТТ ПРИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧАСТОТЕ 50 КГЦ И КПД 15 – 25 %. ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИБО НАГРЕВАЮТ ГАЗ, ЛИБО ИСПОЛЬЗУЮТ ГАЗ С ВЫСОКОЙ СКОРОСТЬЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В НЕМ, НАПРИМЕР, ВОДОРОД, ПРИ ПРОДУВКЕ КОТОРОГО ПРЕДЕЛЬНАЯ ЧАСТОТА ДОСТИГАЕТ 170 КГЦ.

ОТЛИЧИТЕЛЬНОЙ ОСОБЕННОСТЬЮ СВИСТКОВ ЛЕВАВАССЕРА ЯВЛЯЕТСЯ НАЛИЧИЕ ДВУХ ТОРОИДАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРНЫХ КАМЕР, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ПОСЛЕ КОЛЬЦЕВОЙ ЩЕЛИ (РИС. 3.22, В). ВО ВТОРИЧНУЮ РЕЗОНАТОРНУЮ КАМЕРУ ПОТОК ПОПАДАЕТ ПОСЛЕ ОБТЕКАНИЯ ОСНОВНОГО РЕЗОНАТОРА. ВТОРИЧНЫЙ РЕЗОНАТОР ОБЕСПЕЧИВАЕТ УВЕЛИЧЕНИЕ АМПЛИТУДЫ, А, СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ИЗЛУЧАЕМОЙ МОЩНОСТИ. ТАК, ПРИ ДАВЛЕНИИ НА ВХОДЕ  $4 \cdot 10^4$  ПА И РАСХОДЕ ВОЗДУХА 390 М<sup>3</sup>/Ч МОЩНОСТЬ ЗВУКА СОСТАВЛЯЕТ 260 ВТ ПРИ КПД 21 %. ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ВТОРИЧНОГО РЕЗОНАТОРА, РАСПОЛОЖЕННОГО СНАРУЖИ ОТ ОСНОВНОГО, ОПРЕДЕЛЯТСЯ ВЫРАЖЕНИЕМ

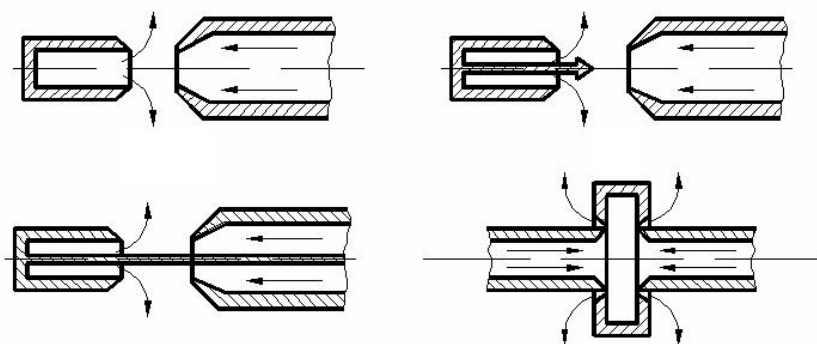
$$f = \frac{A}{d} \sqrt{\frac{D+d}{d}}, \quad (3.13)$$

ГДЕ  $D$  – СРЕДНИЙ ДИАМЕТР ТОРОИДА;  $d$  – ДИАМЕТР ОБРАЗУЮЩЕЙ ТОРОИДА;  $A = 70,3$  М/С.

РАССМОТРЕННЫЕ ГАЗОСТРУЙНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ-ИЗЛУЧАТЕЛИ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ РАБОТАЮТ ОБЫЧНО ПРИ ДОЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ ИСТЕЧЕНИЯ СТРУИ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ПЕРЕПАДУ ДАВЛЕНИЯ НА ВХОДЕ И ВЫХОДЕ МЕНЬШЕ КРИТИЧЕСКОГО:  $\Delta p < 1,9 \cdot 10^5$  ПА. НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВИСТКОВ ДОСТИГАЮТ С ПОМОЩЬЮ РУПОРОВ. НЕСМОТРИ НА БОЛЬШОЙ КПД, АКУСТИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ СВИСТКОВ ВЕСЬМА НЕЗНАЧИТЕЛЬНА, ПОЭТОМУ ИХ РЕДКО ПРИМЕНЯЮТ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ.

КАК ПРАВИЛО, В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗУЮТ СВИСТКИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТИПА ГЕНЕРАТОРА ГАРТМАНА (РИС. 3.23). КОНСТРУКТИВНО ГЕ-

**ГЕНЕРАТОР ГАРТМАНА ВЫПОЛНЕН ОЧЕНЬ ПРОСТО: КОНИЧЕСКОЕ СОПЛО, СООСНО СОПРЯЖЕННОЕ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ, Т.Е. КОНСТРУКЦИЯ, СХОДНАЯ СО СВИСТОМ ГАЛЬТОНА. ОДНАКО МЕХАНИЗМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЕНЕРАТОРЕ**



**Рис. 3.23** Схемы генераторов Гартмана

**ГАРТМАНА И В СВИСТКЕ ГАЛЬТОНА КАЧЕСТВЕННО ОТЛИЧАЮТСЯ. ИЗЛУЧАТЕЛЬ НАЧИНАЕТ РАБОТАТЬ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ В СОПЛЕ ВЫШЕ КРИТИЧЕСКОГО, КОТОРОЕ ДЛЯ ВОЗДУХА СОСТАВЛЯЕТ  $P_{1кр} = 1,88P_0$ , ГДЕ  $P_0$  – АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ. ПРИ ЭТОМ ВНЕ СОПЛА ПОТОК НАЧИНАЕТ ДВИГАТЬСЯ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ, Т.Е. ЧИСЛО МАХА –  $Ma = V/c > 1$ . ВОЗМУЩЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ НА СРЕЗЕ СОПЛА, ВЗАИМОДЕЙСТВУЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ СТРУИ, ОБРАЗУЮТ ЯЧЕЙСТЫЙ ПОТОК, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЙСЯ ПЕРИОДИЧЕСКИМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ДАВЛЕНИЙ ПО ОСИ СТРУИ. НАИБОЛЕЕ ЧЕТКО ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ХАРАКТЕР СТРУИ ПРОЯВЛЯЕТСЯ В ПЕРВЫХ ЯЧЕЙКАХ, ПОСКОЛЬКУ В ДАЛЬНЕЙШЕМ ТУРБУЛИЗАЦИЯ СТРУИ РАЗМЫВАЕТ КАРТИНУ.**

**ДЛЯ ОСЦИЛЛЯЦИОННОЙ ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ СУЩЕСТВУЕТ И ВЕРХНЕЕ КРИТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ (ДЛЯ ВОЗДУХА  $P_{2кр} = 0,48$  МПА), НАРУШАЮЩЕЕ ЯЧЕЙСТЫЙ ХАРАКТЕР; ОНО СВЯЗАНО С ОБРАЗОВАНИЕМ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СТРУИ ПЛОСКОГО СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ – ДИСКА МАХА. СКОРОСТЬ СТРУИ ЗА ДИСКОМ МАХА СТАНОВИТСЯ ДОЗВУКОВОЙ, А ДАВЛЕНИЕ РЕЗКО ВОЗРАСТАЕТ. ДЛИНА ВОЛНЫ  $\lambda$  ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ СТРУИ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ФОРМУЛОЙ ГАРТМАНА**

$$\lambda = 1,12d_c \sqrt{\Delta p - 0,93}, \quad (3.14)$$

**ГДЕ  $d_c$  – ДИАМЕТР СОПЛА;  $\Delta p$  – ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ СОПЛА, ИЛИ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФОРМУЛОЙ ПЕКА**

$$\lambda = 1,22d_c \sqrt{M^2 - 1}. \quad (3.15)$$

**ЭТИ ФОРМУЛЫ ХОРОШО КОРРЕЛИРУЮТ В ОБЫЧНО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИНТЕРВАЛАХ ДАВЛЕНИЙ  $p_c = 0,2...0,4$  МПА ИЛИ ЧИСЕЛ МАХА  $Ma = 1,36...1,7$ .**

**ПРЕДПОЛАГАЕТСЯ СУЩЕСТВОВАНИЕ ДВУХ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ ЗВУКА. РЕЛАКСАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ОСНОВАН НА ПУЛЬСАЦИИ ГАЗА МЕЖДУ РЕЗОНАТОРОМ И СКАЧКОМ УПЛОТНЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩИМСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТОРМОЖЕНИЯ СТРУИ ПРЕГРАДОЙ. СТРУЯ ГАЗА, ПОПАДАЯ В РЕЗОНАТОР, ТОРМОЗИТСЯ, Т.Е. ЕЕ СКОРОСТЬ ПАДАЕТ, ЧТО ВЕДЕТ К МЕСТНОМУ ПОВЫШЕНИЮ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА. ОБРАЗУЕТСЯ ПЛОСКИЙ СКАЧОК УПЛОТНЕНИЯ, И КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ СТРУИ ПРЕОБРАЗУЕТСЯ В ЭНЕРГИЮ СЖАТОГО ГАЗА. ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ДАВЛЕНИЯ В РЕЗОНАТОРЕ**

ОН САМ СТАНОВИТСЯ ИСТОЧНИКОМ ВСТРЕЧНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА, И ДАВЛЕНИЕ В НЕМ ПАДАЕТ. ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ЗАПОЛНЕНИЕ И РАЗГРУЗКА РЕЗОНАТОРА СОЗДАЮТ ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ВСТРЕЧНЫЙ ПОТОК, КОТОРЫЙ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЯ С ПРЯМЫМ ТОКОМ СТРУИ, СТАНОВИТСЯ ИСТОЧНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ. ОДНОВРЕМЕННО С ПУЛЬСАЦИЯМИ НАБЛЮДАЕТСЯ ОСЦИЛЛЯЦИЯ СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ. ДАННАЯ ОСЦИЛЛЯЦИЯ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС РЕЗОНАНСНОГО ХАРАКТЕРА И МОЖЕТ ТАКЖЕ ЯВЛЯТЬСЯ ИСТОЧНИКОМ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ. ТАКОЙ МЕХАНИЗМ НАЗЫВАЮТ РЕЗОНАНСНЫМ. В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ОСЦИЛЛОГРАММЫ ДАВЛЕНИЯ БЛИЗКИ К ГАРМОНИЧЕСКИМ, ЧТО СВИДЕТЕЛЬСТВУЕТ О РЕЗОНАНСНОМ МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЗВУКА. НА НИЗКИХ ЗВУКОВЫХ И ИНФРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТАХ ПОЛУЧЕНЫ ПИЛООБРАЗНЫЕ ОСЦИЛЛОГРАММЫ ДАВЛЕНИЯ, ХАРАКТЕРНЫЕ ДЛЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ.

ГЕНЕРАТОРЫ ГАРТМАНА ИМЕЮТ ЗНАЧИТЕЛЬНО БОЛЬШУЮ ПО СРАВНЕНИЮ СО СВИСТКАМИ МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ И НИЗКИЙ КПД – 6 %, ОБУСЛОВЛЕННЫЙ НЕОБРАТИМЫМИ ПОТЕРЯМИ ЭНЕРГИИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ПРЯМОГО СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ. РАСЧЕТ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ГАРТМАНА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО КПД ПРОИЗВОДЯТ СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОМ. ДИАМЕТР СОПЛА  $d_c$  В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТРЕБУЕМОЙ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮТ ПО ЭМПИРИЧЕСКОЙ ФОРМУЛЕ

$$d_c = 5860/f. \quad (3.16)$$

ПРИ ДИАМЕТРЕ СОПЛА, РАВНОМ ДИАМЕТРУ РЕЗОНАТОРА  $d_p$ , И ГЛУБИНЕ РЕЗОНАТОРА  $h$ , РАССТОЯНИЕ ОТ СОПЛА ДО ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ РЕЗОНАТОРА  $l$  ПОЛУЧАЮТ ИЗ ВЫРАЖЕНИЯ

$$l = \lambda - 0,4a, \quad (3.17)$$

ГДЕ  $A$  – ЛИНЕЙНЫЙ РАЗМЕР ОБЛАСТИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ.

ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КПД ИЗЛУЧАТЕЛЯ ИСПОЛЬЗУЮТ МОДИФИКАЦИЮ ГЕНЕРАТОРА ГАРТМАНА, ОТЛИЧАЮЩУЮСЯ КОСЫМ СКАЧКОМ УПЛОТНЕНИЯ. ПО ОСИ ПОТОКА ВВОДЯТ РАССЕКАТЕЛЬ, ИЗМЕНЯЮЩИЙ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ НА ОСИ И УГОЛ МЕЖДУ ПЛОСКОСТЬЮ СКАЧКА ДАВЛЕНИЯ И ОСЬЮ СТРУИ. ПРИ ЭТОМ УМЕНЬШАЮТСЯ ПЕРЕПАД СКОРОСТЕЙ ДО И ПОСЛЕ СКАЧКА, А СЛЕДОВАТЕЛЬНО, И ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ НА ПЕРЕХОДЕ. В РЕЗУЛЬТАТЕ КПД ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ГАРТМАНА ПРИБЛИЖАЕТСЯ К КПД СВИСТКОВ, Т.Е. СОСТАВЛЯЕТ 18 – 25 % ПРИ ИНТЕНСИВНОСТИ В НЕСКОЛЬКО ДЕСЯТКОВ ВАТТ НА КВАДРАТНЫЙ САНТИМЕТР. МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДОСТИГАЮТ ПРИ СООТНОШЕНИИ  $d_p/d_c = 1,6$ . ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГАЗОСТРУЙНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ГАРТМАНОВСКОГО ТИПА ПРИВЕДЕНЫ НА РИС. 3.23. ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗУЮТ БАТАРЕИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ, ОБЪЕДИНЕННЫЕ ОБЩИМ РУПОРом, КОТОРЫЕ ИНОГДА НАЗЫВАЮТ СТАТИЧЕСКИМИ СИРЕНАМИ [3].

В клапанных генераторах основными элементами являются сопло и мембранный клапан, закрывающий выход сопла [17]. Если мембрана закреплена по краю, то газ может выходить в центральной области сопла, если в центре, то газ выходит через периферию сопла.

Работа таких генераторов заключается в следующем: газ под давлением подается в сопло, под действием газа незакрепленная часть мембраны отодвигается от торца сопла, и часть газа проскакивает наружу. Вследствие кратковременного увеличения скорости газа от нуля до некоторой величины статическое давление газа понижается. Это вызывает возвращение клапана под действием внешнего давления и силы упругости растянутой мембраны в исходное состояние и падение скорости (возрастание давления) – процесс повторяется. Мембрана совершает колебания с частотой, соответствующей одной из возможных собственных мод (номер моды зависит от способа закрепления и способа возбуждения мембраны). Если мембрана жесткая, то ее можно не закреплять по краям или в центре, она может свободно лежать в некоторых ограничителях. На низких частотах возможно применение металлических мембран, на высоких частотах их применение нецелесообразно из-за

быстрой поломки. Для генерации высокочастотных колебаний необходимо использовать в качестве материала для мембраны полимерную пленку.

Всем генераторам дипольного типа свойственен следующий недостаток: если характерный размер генератора существенно меньше длины волны генерируемого звука, то возникает акустическое короткое замыкание, резко снижающее эффективность генератора. Для устранения этого вредного эффекта мембранные генераторы устанавливают в рефлекторах, согласующих рупорах или трубе [17].

**ДИНАМИЧЕСКИЕ СИРЕНЫ (РИС. 3.24) СОСТОЯТ ИЗ СТАТОРНОГО ДИСКА 1 И ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РОТОРНОГО ДИСКА 2 С БОЛЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ ОСЕСИММЕТРИЧНО**

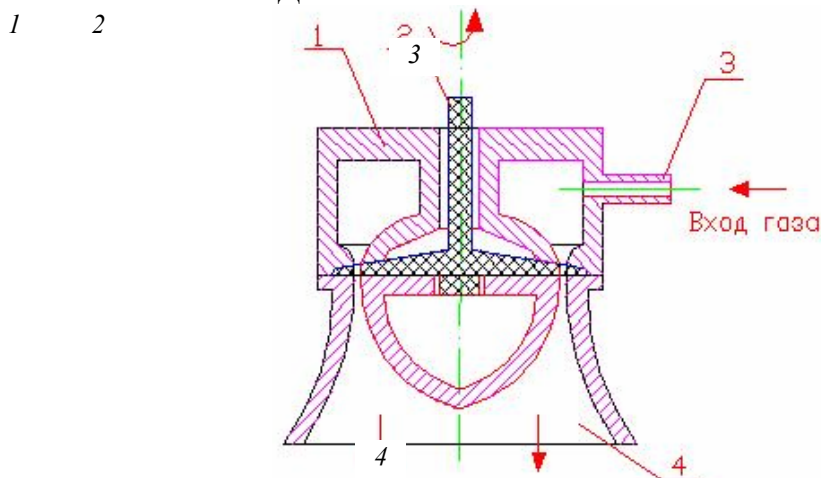


Рис. 3.24 Динамическая сирена

**РАСПОЛОЖЕННЫХ ПО ПЕРИФЕРИИ ОТВЕРСТИЙ. ПОСКОЛЬКУ ПОТОК ГАЗА, ПОДАЮЩИЙСЯ В ПАТРУБОК 3 И ПРОДУВАЕМЫЙ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ, ПЕРИОДИЧЕСКИ ПРЕРЫВАЕТСЯ ВРАЩАЮЩИМСЯ РОТОРНЫМ ДИСКОМ, ВОЗНИКАЮТ ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ, СОЗДАЮЩИЕ ИНТЕНСИВНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В РЕЗОНАТОРЕ 4 [3]. ЧАСТОТА ИЗЛУЧАЕМЫХ КОЛЕБАНИЙ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА И ЧИСЛОМ ОТВЕРСТИЙ.**

**ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ИСПОЛЬЗУЮТ СИРЕНЫ С ДВУМЯ ВРАЩАЮЩИМСЯ РОТОРАМИ. ДИНАМИЧЕСКИЕ СИРЕНЫ ПОЗВОЛЯЮТ СОЗДАТЬ БОЛЬШУЮ АКУСТИЧЕСКУЮ МОЩНОСТЬ (ДО НЕСКОЛЬКИХ КИЛОВАТТ) ПРИ ВЫСОКОМ КПД (ДО 40 %). С ИХ ПОМОЩЬЮ ВОЗМОЖНО В ШИРОКИХ ПРЕДЕЛАХ РЕГУЛИРОВАТЬ ЧАСТОТУ ИЗЛУЧЕНИЯ. ОДНАКО НА ПРАКТИКЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИРЕНЫ ПОКА НЕ НАШЛИ ШИРОКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ИЗ-ЗА СЛОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ.**

### 3.3 ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Лучшими, с точки зрения механической активации, являются измельчители, реализующие либо локальные высокие давления с истиранием и сдвигом, либо высокоскоростной удар. Конструктивное оформление механоактиваторов в ряде случаев совпадает с конструктивным оформлением мельниц тонкого и сверхтонкого помола материалов: центробежно-планетарных, дезинтеграторов, многоступенчатых ударно-отражательных мельниц, струйных мельниц, диспергаторов различного конструктивного оформления [18 – 22].

Все конструкции механоактиваторов можно разбить на три группы [18]. К первой группе относятся активаторы для систем газ – твердое вещество, в которых механоактивация происходит при параллельном тонком измельчении твердой фазы (центробежно-планетарные, дезинтеграторы, центробежные, многоступенчатые, ударно-отражательные и т.д.). Достоинство таких машин – возможность достижения высокой степени измельчения и активации порошков. Наибольшую активацию обеспечивают центробежно-планетарные активаторы-измельчители при сложном характере движе-

ния активирующих и измельчающих шаров. Однако в них наблюдается и наибольшая степень загрязненности активируемых порошков продуктами намола шаров и корпусов машин. Кроме этого, большая напряженность элементов конструкций снижает срок службы этих механизмов и сильно усложняет реализацию процесса активации при средних и больших производительностях по активируемым порошкам. Поэтому в промышленности наиболее часто используются активаторы, реализующие многократный высокоскоростной удар (дезинтеграторы, многоступенчатые, ударно-отражательные, центробежные мельницы), но они предназначены для активации и измельчения мягких и средней твердости материалов, так как при высокоскоростном ударном нагружении твердых, абразивных материалов быстро выходят из строя малогабаритные рабочие органы активаторов.

Ко второй группе можно отнести активаторы для систем жидкость – твердое, в которых активизируются полимерные и коллоидные субстанции за счет высоких скоростей сдвига при одновременном наложении на касательные сдвиговые напряжения мощных импульсных напряжений при схлопывании искусственно генерируемых кавитационных пузырьков.

В третьей группе объединены механоактиваторы, используемые для абразивных материалов. В таких машинах, работа которых основана на многократном высокоскоростном ударном нагружении в слое активируемого материала, не происходит загрязнения материалов, остаточная кинетическая энергия частиц порошков затрачивается на процесс их истирания в слое и сравнительно просто реализуются комбинированные процессы тепло- и массообмена, смешения, измельчения и классификации, а также химических реакций в системе газ – активируемые в объеме реактора порошки.

В мельницах ударного действия материал разрушается высокоскоростным ударом частиц о рабочие органы или друг о друга. Преимущество таких мельниц – это компактность, относительно малая металлоемкость, возможность получения тонкодисперсных порошков при относительно малых энергозатратах, высокая степень механохимической активации продуктов помола. Общим недостатком мельниц этой группы является быстрый абразивный износ мелющих органов, что ограничивает межремонтный ресурс, а в ряде случаев делает их неприменимыми, если в продуктах измельчения недопустимо содержание намола металла [18].

По способу подвода энергии к материалу эти мельницы можно разделить на механические и пневматические (струйные). Известно большое количество механических ударных мельниц, но наиболее употребительны дезинтеграторы, дисмембраторы, ударно-отражательные мельницы в малотоннажных технологиях и молотковые мельницы – в крупнотоннажных.

Дезинтегратор состоит из двух входящих друг в друга роторов, представляющих собой диски с закрепленными в них размольными элементами в виде пальцев, вращающихся в противоположные стороны (рис. 3.25). В дисмембраторе (пальцевом измельчителе) вращается один диск, а второй диск неподвижный (рис. 3.26). Различают дисмембраторы с вертикальным и горизонтальным валом ротора. Исходный продукт

исходный  
продукт

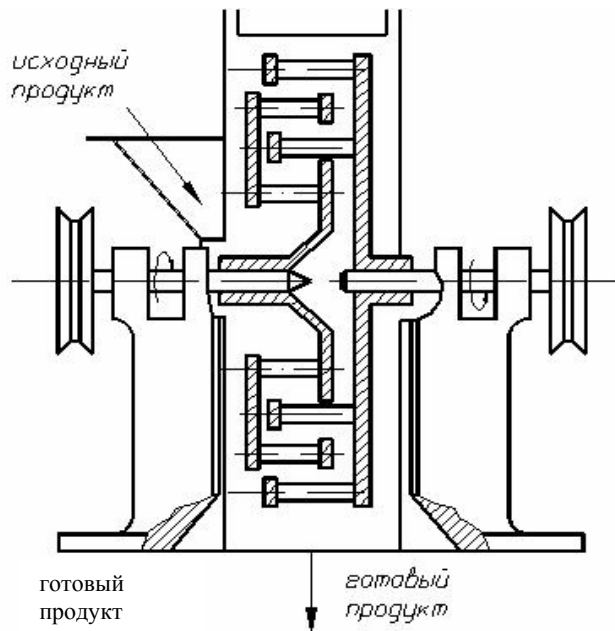


Рис. 3.25. Схема дезинтегратора

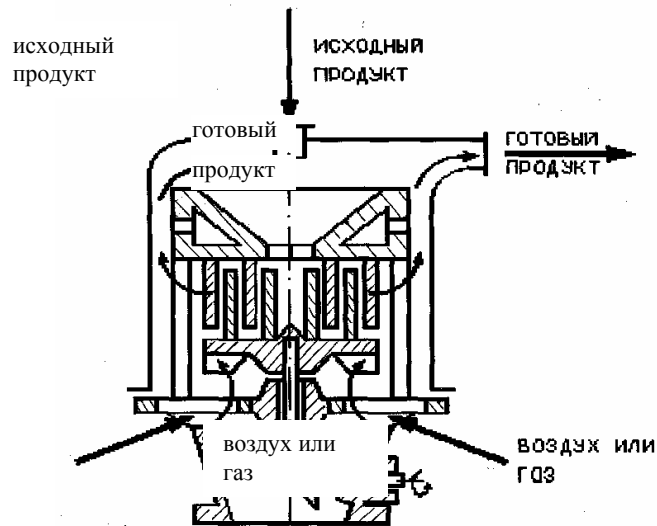


РИС. 3.26 СХЕМА ДИСМЕМБРАТОРА

непрерывно подается через воронку к центру дисков, где под действием центробежных сил проходит между пальцами и, ударяясь о них, измельчается.

Среди мельниц ударно-отражательного действия большое распространение нашли мельницы с внутренней классификацией. К их достоинствам следует отнести возможность получения очень тонких порошков при относительно невысоких энергозатратах. В качестве примера представлена трехступенчатая мельница с центробежной классификацией в каждой ступени (рис. 3.27). Мельница состоит из корпуса 1 с загрузочным патрубком исходного материала 2, вала 3 с ротором 4, на котором закреплены диски 5 с ударными элементами 6 разгрузочного патрубка 7. Размалываемый материал через патрубок 2 попадает под ударные элементы 6 в первой ступени и измельчается. Из пространства между дисками первой и второй ступени материал попадает в зону центробежно-противоточной классификации. Мелкие частицы потоком воздуха, создаваемым вентилятором 8, выносятся через окна 10 ротора 4 и центральное отверстие 9 в патрубке 7 и поступают в готовый продукт, а крупные частицы отбрасываются центробежными силами на ударные элементы 6 второй ступени, и процесс повторяется. Крупные, не разрушенные в последней ступени, частицы по трубе 11 возвращаются на дополнительное измельчение в первую ступень. Увеличение

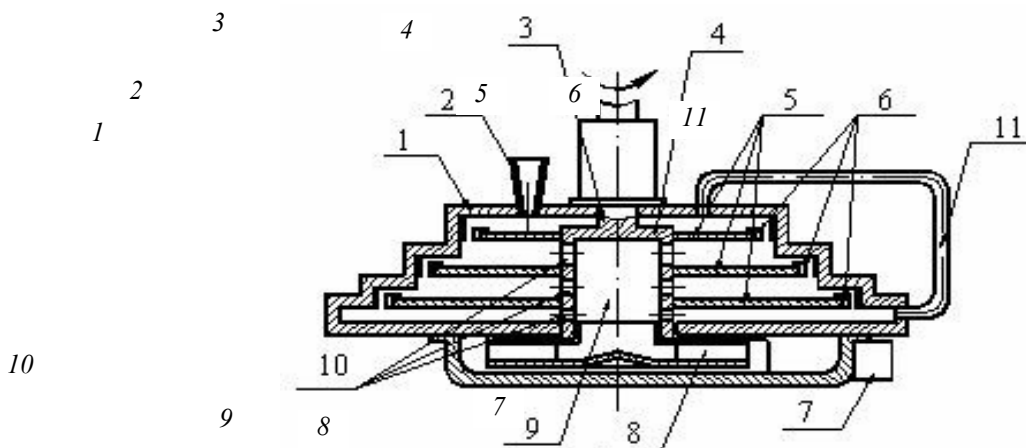


Рис. 3.27 Схема мельницы с внутренней классификацией

**о**кружной скорости ударных элементов по ходу измельчения позволяет **повышать скорость нагружения частиц по мере уменьшения их размеров и сохранять тем самым высокую эффективность размола. Этому же сопутствует и вывод мелких частиц из каждой ступени.**

Молотковые мельницы применяются в средне- и крупнотоннажных производствах для грубого и среднего измельчения малоабразивных материалов: угля, мела, глин, известняка, некоторых видов пластмасс. При увеличении окружной скорости по сравнению с обычно применяемыми (40...60 м/с) до 90 м/с и выше, молотковые мельницы можно использовать для измельчения искусственных и натуральных кож, резины и т.п. Они состоят из корпуса 1, защищенного изнутри броневыми плитами, в которых вращается ротор, представляющий собой вал 2 с дисками 3, билдержателями 4 и билами 5 (рис. 3.28). Непосредственно на корпусе мельницы устанавливается центробежный или инерционный сепаратор. Корпус мельницы имеет тангенциальный подвод для сушильно-транспортирующего агента. Измельчаемый материал поступает в мельницу по специальному желобу или вместе с сушильно-транспортирующим агентом, измельчается билами и выдувается в сепаратор, где готовый продукт отделяется и вместе с охлажденным агентом выводится через патрубок 7, а неизмельченный материал по желобу 8 возвращается в мельницу. Крупность готового продукта регулируется изменением угла поворота закручивающих лопаток центробежного сепаратора или угла установки шиберов. Мельницы с центробежным сепаратором предназначены для более тонкого помола, с инерционными – более грубого.

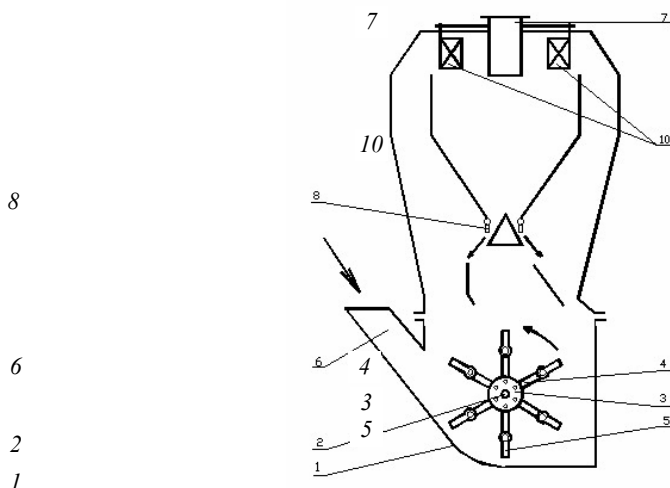


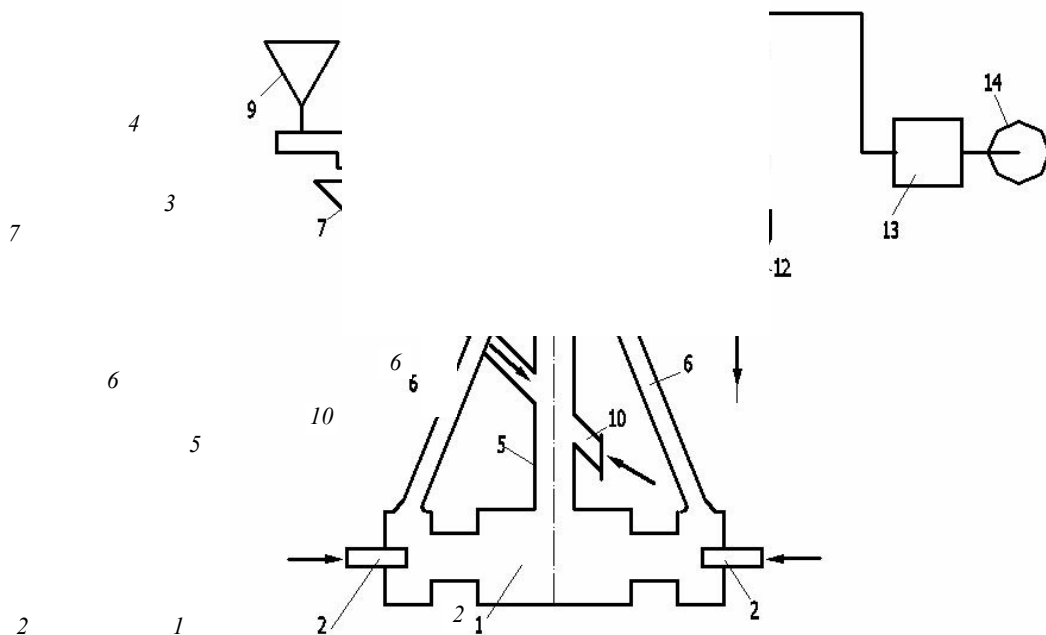
Рис. 3.28 Схема молотковой мельницы

Измельчение в струйных мельницах достигается за счет взаимного соударения частиц, разогнанных до скоростей 100...250 м/с. К их достоинствам следует отнести возможность тонкого и сверхтонкого су-

хого помола не только при умеренных, но и при повышенных (до 1200 °К) температурах, отсутствие вращающихся деталей, незначительное загрязнение продуктов измельчения «намолом» деталей мельницы.

Вместе с тем струйные мельницы отличаются относительно большими удельными энергозатратами, а также требуют установки после себя громоздкой системы пылеулавливания, поскольку из-за невысоких концентраций измельчаемого материала в транспортирующем газе (около 0,1 кг/кг) расходы газа велики.

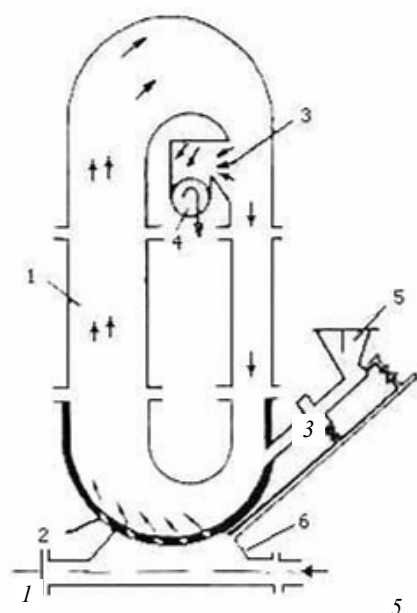
Из большого разнообразия конструкций струйных мельниц наиболее распространены два типа: противоточные и О-образные (кольцевые). Противоточная струйная мельница (рис. 3.29) содержит помольную камеру 1, противоточные разгонные устройства 2, сепарационную камеру 3 и вращающийся сепаратор 4. Поступающий в патрубок 7 исходный материал подхватывается потоком газа, разделяется в сепараторе 4 на мелкие частицы, выносимые из мельницы, и крупные, поступающие по желобам 6 в эжекторы разгонных устройств 2, куда также под давлением подается энергоноситель – воздух, газ, пар. В помольной



**Рис. 3.29** Схема противоточной струйной мельницы

камере струи, несущие частицы материала, сталкиваются и за счет соударений частиц происходит их разрушение, далее смесь размолотого материала и газа выносится в патрубок 5.

Кольцевая струйная мельница (рис. 3.30) состоит из размольной камеры 1, сопловой решетки 2, жалюзийного сепаратора 3, разгрузочного патрубка 4, загрузочной воронки 5, коллектора энергоносителя 6. Исходный материал, поступающий в камеру 1, подхватывается струями воздуха, выходящими со сверхзвуковой скоростью из сопел 2, и разгоняется, при этом частицы измельчаются за счет соударений о стенки камеры и друг о друга и поднимаются вверх. При повороте за счет центробежных сил крупные частицы концентрируются у наружной стенки, мелкие – у внутренней. Через жалюзийную решетку 3 вместе с газом отсасывается готовый продукт, а крупный подается на дополнительное измельчение [18].



**Рис. 3.30** Схема кольцевой струйной мельницы

Барабанные мельницы относятся к машинам ударно-истирающего действия и по способу возбуждения движения мелющих тел делятся на мельницы с вращающимся барабаном, вибрационные и центробежные.

Этот наиболее многочисленный и широко применяемый класс машин используется для грубого, среднего, тонкого и сверхтонкого измельчения горнохимического сырья, руд, известняка, клинкера, пигментов, солей, шлаков и других материалов.



Среди барабанных мельниц наиболее распространены (в первую очередь, в многотоннажных производствах) вращающиеся барабанные мельницы. Вращающаяся барабанная мельница (рис. 3.31) представляет собой пустотелый цилиндрический (реже цилиндро-конический) барабан 2, выложенный изнутри броней и закрытый торцевыми крышками 1 и 3, заполненный определенным количеством измельчающих тел 4 и вращающийся вокруг горизонтальной оси. В непрерывно работающих мельницах измельчаемый материал подается через центральное отверстие в одной из крышек внутрь барабана и, продвигаясь вдоль него, разрушается измельчающими телами посредством удара, истирания и раздавливания.

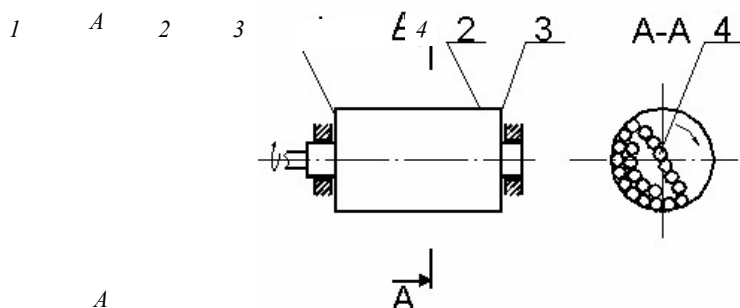


Рис. 3.31 Схема барабанной мельницы

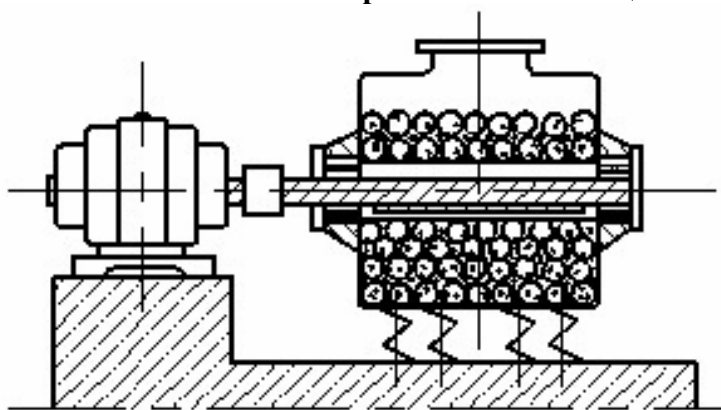


Рис. 3.32. Схема вибрационной мельницы

**ВЫГРУЗКА ИЗМЕЛЬЧЕННОГО МАТЕРИАЛА ПРОИЗВОДИТСЯ ЛИБО ЧЕРЕЗ ЦЕНТРАЛЬНОЕ ОТВЕРСТИЕ В РАЗГРУЗОЧНОЙ КРЫШКЕ, ЛИБО ЧЕРЕЗ РЕШЕТКУ СО ЩЕЛЕВИДНЫМИ ИЛИ КРУГЛЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ, ЛИБО ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ НА КОНЦЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ БАРАБАНА.**

В мельницах периодического действия материал загружается и выгружается через люк в цилиндрической части барабана или в одной из торцевых крышек. Длинные барабаны позволяют увеличить время пребывания в них материала и получить более тонкий помол за один проход, а также уменьшить диаметр барабана у мельниц большой производительности. В зависимости от вида измельчающей среды различают мельницы шаровые (стальные или чугунные шары одного или нескольких размеров, диаметром 30...120 мм, фарфоровые или другие неметаллические шары), стержневые (стальные стержни длиной, близкой к внутренней длине барабана, одного или нескольких диаметров в интервале 40...125 мм), галечные (окатанная кремневая галька), рудно-галечные (крупнокусковые фракции, выделенные из измельчаемой руды), самоизмельчения или полусамоизмельчения (соответственно куски самого материала или смесь с крупными стальными шарами). В ряде случаев вместо шаров в мельницах используют стальной или чугунный цельпесбс (цилиндрики или усеченные конусы), а также металлические тела в форме эллипсоидов, трубок, дисков [18].

Вибрационная мельница (рис. 3.32) состоит из одного или двух (включенных параллельно или последовательно) барабанов, заполненных на 70...90 % объема шарами или цельпесбсом диаметром 0,5...5 мм и приводимых в колебательное движение дебалансным или гирационным вибратором. Барабаны ус-

тановлены на пружинных или резиновых опорах. Колебания барабана передаются измельчающим телам, что ведет к измельчению подаваемого в барабан материала. Вибрационные мельницы используются для тонкого и сверхтонкого сухого и мокрого измельчения, как периодического, так и непрерывного действия. Обычно работают в открытом цикле, но могут функционировать и в замкнутом цикле с классификатором. Производительность вибрационной мельницы сильно зависит от крупности исходного материала и особенно от тонкости помола и для одной и той же установки может изменяться в десятки раз. Методы расчета производительности отсутствуют, может использоваться метод моделирования [18].

Молотковые дробилки могут быть разделены на две группы: одно- и двухроторные. Последние изготавливаются в двух вариантах: с последовательным и параллельным дроблением. Наиболее распространены однороторные молотковые дробилки, среди которых различают односторонние (нереверсивные) (рис. 3.33) и реверсивные с колосниковыми решетками (рис. 3.34) и без них (рис. 3.35).

В реверсивных дробилках (рис. 3.35) степень использования металла молотков выше, чем в нереверсивных, что позволяет примерно в 1,5 раза

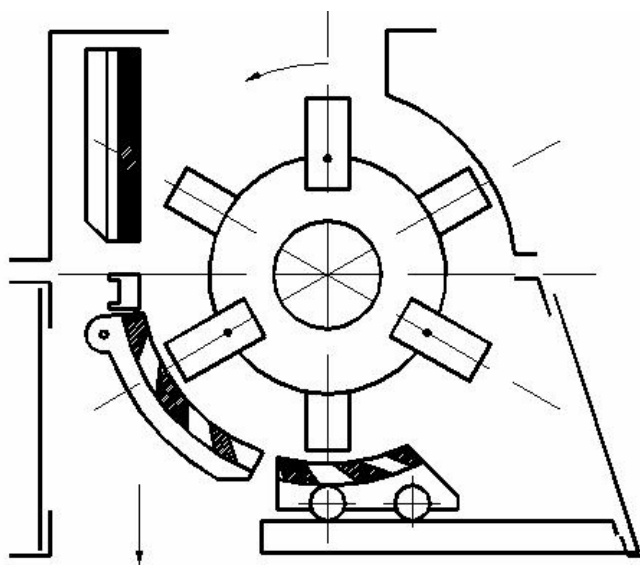


Рис. 3.33 Схема молотковой односторонней дробилки

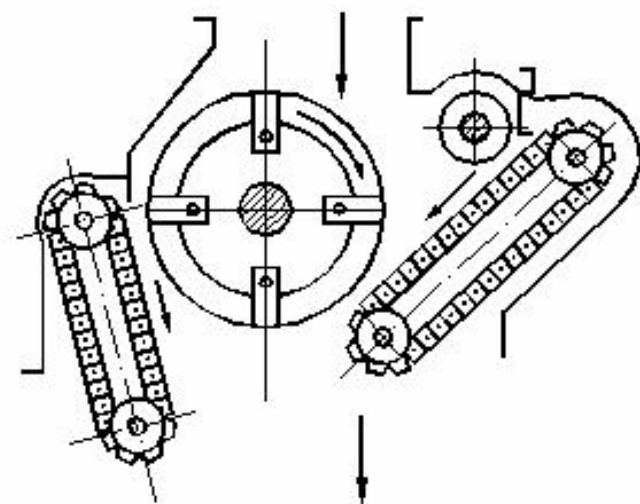
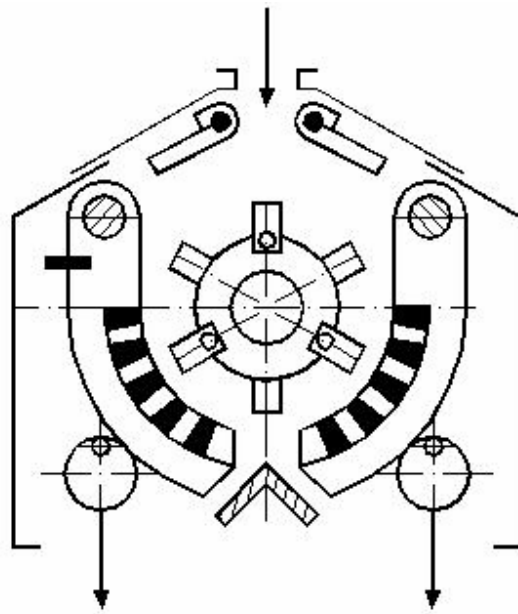


Рис. 3.34 Схема реверсивной дробилки с колосниковыми решетками



**Рис. 3.35** Схема реверсивной дробилки

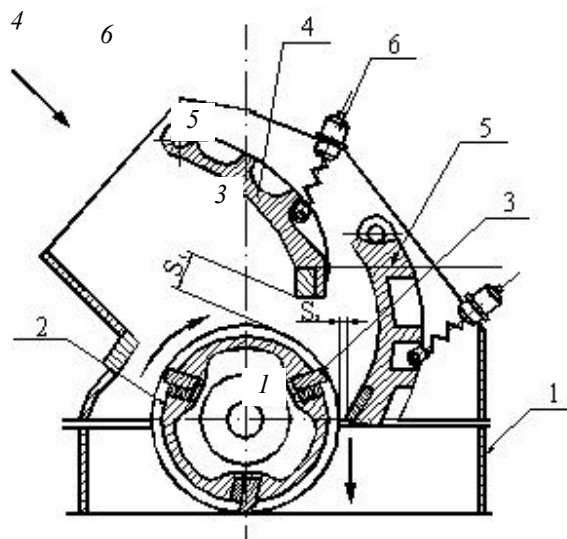
**УВЕЛИЧИТЬ СРОК НЕПРЕРЫВНОЙ РАБОТЫ ДРОБИЛКИ. КОЛОСНИКОВАЯ РЕШЕТКА ОГРАНИЧИВАЕТ РАЗМЕРЫ КРУПНЫХ КУСКОВ В ДРОБЛЕНОМ ПРОДУКТЕ. ДРОБИЛКИ БЕЗ РЕШЕТОК УПОТРЕБИТЕЛЬНЫ ПРИ РАБОТЕ С ЗАМАЗЫВАЮЩИМИ, ГЛИНИСТЫМИ МАТЕРИАЛАМИ, ПОЭТОМУ В ИХ СОСТАВЕ ПРИСУТСТВУЮТ СПЕЦИАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТЕНОК ДРОБИЛКИ ОТ НАЛИПШЕГО МАТЕРИАЛА.**

Ротор молотковой дробилки состоит из вала, насаженных на него дисков, разделяемых шайбами, и шарнирно укрепленных на дисках молотков. Масса молотка 3,5...150 кг. Легкие молотки (3,5...30 кг) применяются для материалов исходной крупностью до 100...200 мм, средние (30...60 кг) – до 600 мм, тяжелые (60...150 кг) – для самых крупных кусков твердых материалов. Съемные колосниковые решетки снабжаются приспособлениями для регулирования зазора между ними и молотками.

Окружная скорость ротора принимается в пределах 40...60 м/с и в некоторых случаях достигает 75 м/с. С ростом окружной скорости увеличивается производительность дробилки и кратность измельчения материала, однако, на мягких материалах при этом образуется значительное количество мелочи [18].

Роторные дробилки (рис. 3.36), как и молотковые, бывают одно- и двухроторными, с колосниковыми решетками и без них, с нереверсивными

2



**Рис. 3.36 Роторная дробилка:**

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – ударный элемент; 4 – верхний отбойник;  
5 – нижний отбойник; 6 – демпфер

и реверсивными роторами. Их выпускают для крупного и среднего дробления. Окружная скорость ротора выбирается в пределах 20...40 м/с.

**В АППАРАТАХ ВЗРЫВНОГО ТИПА ИСПОЛЬЗУЕТСЯ РАЗРУШАЮЩИЙ ЭФФЕКТ МГНОВЕННОГО СБРОСА ДАВЛЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОЙ СРЕДЫ, В КОТОРОЙ ПОМЕЩЕН ИСХОДНЫЙ МАТЕРИАЛ. ЭТОТ СПОСОБ РАЗЛОМА МОЖЕТ БЫТЬ ВЕСЬМА ЭКОНОМИЧНЫМ, ПОСКОЛЬКУ УСИЛИЕ, ТРЕБУЮЩЕЕСЯ ДЛЯ РАЗРЫВА ЧАСТИЦ ПУТЕМ РАСТЯЖЕНИЯ, В НИКОЛЬКО РАЗ МЕНЬШЕ УСИЛИЯ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ТАКОГО**

5

6

1

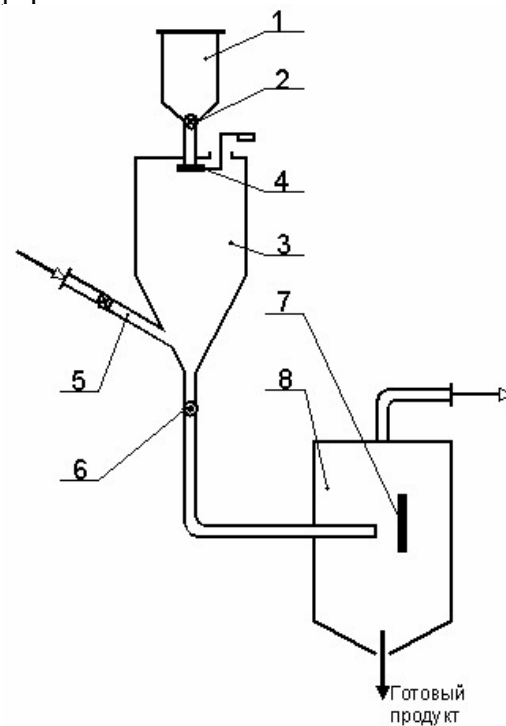
2

4

3

7

8



Готовый  
продукт

Готовый  
продукт

**Рис. 3.37. Схема аппарата взрывоструйного типа**

Снайдера (рис. 3.37) описанный процесс разрушения под действием внутренних сил растяжения дополнен процессом струйного разрушения. Исходный материал загружается в воронку 1 и с помощью клапана 2 подается в камеру сжатия 3, снабженную затвором 4. После заполнения камеры 3 до определенного уровня затвор 4 плотно закрывается и по трубе 5 в камеру подается пар или газ в течение 5 с времени, необходимого для создания давления около 16 МПа. Затем специальным устройством открывается быстродействующий клапан 6 и содержимое камеры 3 со скоростью, близкой к звуковой, выбрасывается в камеру низкого давления 8, объем которой примерно в 50 раз больше, чем у камеры 3. В камере 8 частицы разрушаются как за счет разрывающих усилий, так и за счет удара их с большой скоростью о плиту 7 [18].

### Список литературы к главе 3

1. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. – М.: Химия, 1990. – 208 с.
2. Кардашев Г.А., Михайлов П.Е. Тепломассообменные акустические процессы и аппараты. – М.: Машиностроение, 1973. – 223 с.
3. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособие для вузов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
4. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
5. Бутков В.В., Вишняков В.В. Процессы и аппараты химической технологии с использованием электрических полей. – М.: НИИТЭХИМ, 1982. – 48 с.
6. Грановский М.Г., Лавров И.С., Смирнов О.В. Электрообработка жидкостей. – Л.: Химия, 1976. – 216 с.
7. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.

8. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде (гидродинамическое описание). – М.: Наука, 1971. – 190 с.
9. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Под ред. Г.А. Гулого. – М.: Машиностроение, 1977. – 320 с.
10. Рогов И.А., Горбатов А.В. Физические методы обработки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 584 с.
11. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. – Киев: Техника, 1976. – 140 с.
12. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М.: Машиностроение, 2001. – 260 с.
13. Римский-Корсаков А.В., Баженов Д.В., Баженова Л.А. Физические основы образования звука в воздуходушных машинах. – М.: Наука, 1988. – 173 с.
14. Карпачева С.М., Рябчиков Б.Е. Пульсационная аппаратура в химической технологии. – М.: Химия, 1983. – 224 с.
15. Вибрационные массообменные аппараты / И.Я. Городецкий, А.А. Васин, В.М. Олевский, П.А. Лупанов; Под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1980. – 192 с.
16. Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах. – Киев: Вища шк., 1984. – 68 с.
17. Акулов Н.И., Юдаев В.Ф. Акустическая коагуляция аэрозолей и ее аппаратное оформление. – М.: Пищепромиздат, 2003. – 232 с.
18. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование: В 5 т. Т. 2: Механические и гидромеханические процессы / Д.А. Баранов, В.Н. Блиничев, А.В. Вязьмин и др.; Под ред. А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2001. – 600 с.
19. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
20. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. – М.: Изд-во лит. по строит-ву, 1972. – 238 с.
21. Ермилов П.И. Диспергирование пигментов. – М.: Химия, 1971. – 300 с.
- 22 КАФАРОВ В.В., ДОРОХОВ И.Н., АРУТЮНОВ С.Ю. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ. КН. 5: ПРОЦЕССЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И СМЕШЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ. – М.: НАУКА, 1985. – 440 С.**