

В.М. ЧЕРВЯКОВ, В.Г. ОДНОЛЬКО

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И
КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ
В РОТОРНЫХ АППАРАТАХ**

МОСКВА
"МАШИНОСТРОЕНИЕ"
2008

УДК 62-13:532.5.013
ББК Л111-5
Ч 45

Рецензенты:
Доктор технических наук
А.М. Карпов
Кандидат технических наук
Е.А. Мандрыка

Червяков, В.М.
Ч 45 Использование гидродинамических и кавитационных явлений в
роторных аппаратах: монография / В.М. Червяков,

В.Г. Однолько. – М.: Машиностроение, 2008. – 116 с.
ISBN 978-5-94275-451-8.

Представлены результаты экспериментального исследования гидродинамики течения несжимаемой и сжимаемой жидкостей, акустической кавитации, резонанса в рабочих зонах роторного аппарата и их влияние на скорость технологических процессов. Изложены результаты практического использования разработанных конструкций аппаратов для различных технологических процессов.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами нестационарных течений, кавитации и резонанса в технологических объемах. Может быть полезна магистрантам и аспирантам, обучающимся по технологическим специальностям.

УДК 62-13:532.5.013
ББК Л111-5

ISBN 978-5-94275-451-8

© Червяков В.М., Однолько В.Г., 2008

В.М. Червяков, В.Г. Однолько

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И
КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ
В РОТОРНЫХ АППАРАТАХ**

Москва
"Машиностроение"
2008

Научное издание

**Червяков Виктор Михайлович,
Однолько Валерий Григорьевич**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И
КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ
В РОТОРНЫХ АППАРАТАХ**

Редактор *З.Г. Чернова*

Инженер по компьютерному макетированию *М.Н. Рыжкова*

Сдано в набор 05.12.2008 г. Подписано в печать 30.12.2008 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,74. Уч.-изд. л. 6,5.
Тираж 400 экз. Заказ 604

ООО "Издательство Машиностроение",
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

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

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)638108

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время в связи с перспективой энергетического кризиса из-за сокращения разведанных запасов энергоносителей особенно остро встала задача создания технологического оборудования с низкими удельными энергозатратами на проведение различных химико-технологических процессов и одновременно позволяющих повысить качество производимой продукции. К такому оборудованию с полным основанием относят устройства, которые можно объединить под одним названием – роторные аппараты. В них осуществляется комплексное воздействие на обрабатываемую среду. Основными факторами, интенсифицирующими различные физико-химические, гидромеханические тепло- и массообменные процессы, являются: интенсивная импульсная кавитация, развитая турбулентность, механическое воздействие, высокие сдвиговые напряжения, гидравлические удары и т.д.

Низкая энергоемкость роторных аппаратов обусловлена тем, что обрабатываемая среда является и источником, и объектом колебаний, т.е. в роторных аппаратах механическая энергия непосредственно преобразуется в акустическую.

Теоретическое и экспериментальное исследование всего комплекса эффектов и процессов, протекающих в роторных аппаратах, несомненно, является актуальной задачей.

В 2007 г. вышла монография "Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах" авторов В.М. Червякова, В.Ф. Юдаева [1], в которой изложены новейшие теоретические исследования особенностей нестационарного течения несжимаемой и сжимаемой среды в рабочих зонах аппарата, предложен метод расчета потребляемой мощности привода. Исследовано влияние различных конструктивных и режимных параметров роторного аппарата, содержания свободного газа в жидкости на закономерности процесса кавитации. Данная работа является прямым продолжением вышеуказанной монографии. В ней авторы теоретически рассматривают условия возникновения резонанса в каналах статора и камеры озвучивания. Большая часть монографии посвящена экспериментальному подтверждению теоретических исследований, проведенных в работе [1]. Кроме того, в монографии рассматриваются конструктивные решения, предложенные на основании комплекса проведенных теоретических и экспериментальных исследований, и результаты их промышленного внедрения.

Авторы выражают благодарность А.И. Четырину за участие в проведении значительной части экспериментального исследования и неоценимую помощь при подготовке рукописи к печати.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- a_2, a_c – ширина каналов ротора, статора по внешней поверхности ротора и внутренней поверхности статора, м;
 b_p, b_c – расстояние между каналами ротора, статора по внешней поверхности ротора и внутренней поверхности статора, м;
 c – скорость звука в двухфазной среде, м/с;
 $d_{эс}$ – эквивалентный диаметр канала статора, м;
 H_p, H_c – высота каналов в роторе, статоре, м;
 l_p, l_c, l_k – геометрические длины канала ротора, канала статора и камеры озвучивания, м;
 $N_{з.р}, N_{з.о}$ – мощность, диссипируемая в радиальном и осевом зазоре, Вт;
 N_k – мощность, затрачиваемая на сообщение кинетической энергии жидкости в полости ротора, Вт;
 N_m – механические потери мощности, Вт;
 n_p – частота вращения ротора, об/мин;
 $|P|_m$ – модуль амплитуды отрицательного давления, Па;
 $\Delta P = 0,5\kappa\rho\omega^2(R_2 - l) + \rho\omega^2 l(1 - \chi) + \Delta P_b$ – перепад давления между полостью ротора и камерой озвучивания, Па;
 $P_S = P_\infty - P_V + 2\sigma/R_0$ – давление жидкости на границе с пузырьком, Па;
 P_p, P_k – давление в полости ротора и камере озвучивания, Па;
 Q – объемный расход среды через аппарат, м³/с;
 R_1, R_2, R_c – внутренний, наружный радиус цилиндрического ротора, внутренний радиус цилиндрического статора, м;
 $R_{1к}, R_{2к}$ – малый и большой радиусы конического ротора, м;
 $S_p, S_c, S(t)$ – площадь поперечного сечения канала ротора, статора, диафрагмы модулятора, м²;
 v_c, v_p, v_1 – радиальные компоненты скорости в канале статора, ротора и на его входе, м/с;
 $V = \sqrt{2\Delta p/\rho}$ – масштаб радиального компонента скорости в канале ротора, м/с;
 z_p, z_c – число каналов в роторе, статоре;
 δ_a, δ – относительный радиальный и радиальный(м) зазоры;
 ξ_r – коэффициент местного гидравлического сопротивления;
 ξ – относительный осевой зазор;

μ, ν – коэффициенты динамической и кинематической вязкости, Па·с, м²/с;
 ρ – плотность среды, кг/м³;
 $K_k = \omega R_2 / V$ – критерий, оценивающий соотношение центробежной и кориолисовой сил;
 $K_c = \Delta P / P_S$ – критерий кавитации Стайлса;
 $Sh = l / VT = K_k l / a_p$ – критерий Струхала для течения жидкости в канале ротора;
 $\chi_r = 2P_S / \rho_L < \nu >^2$ – критерий гидродинамической кавитации;
 $\chi_a = P_S / |P|_m$ – критерий акустической кавитации.

1. РЕЗОНАНС В РОТОРНЫХ АППАРАТАХ

1.1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ РЕЗОНАНСА И СТОЯЧИХ ВОЛН В КАНАЛАХ СТАТОРА И КАМЕРЕ ОЗВУЧИВАНИЯ

Резонанс – явление возрастания амплитуды вынужденных колебаний в какой-либо колебательной системе, наступающее при приближении частоты периодического внешнего воздействия к одной из частот собственных колебаний системы. Характер резонанса существенно зависит от свойств колебательной системы.

Особенности резонансных явлений в модуляторе роторного аппарата (рис. 1.1) впервые были рассмотрены в [2]. Эти явления были ошибочно отнесены к автоколебаниям, так как эти процессы достаточно внешне похожи. В настоящее время эти явления классифицируются как резонансные с образованием стоячих волн в каналах статора и камере озвучивания роторного аппарата [3].

Колебания в каналах статора можно рассматривать как задающую колебательную систему с распределенными параметрами. Это возможно только в предложенных длинноканальных роторных аппаратах с $l_c / d_{3,c} > 2$. В канале распространяются с конечной скоростью звуковые волны, чем и определяются свойства канала. Эти свойства рассматриваются в двух случаях: с точки зрения установившегося и неустойчивого режима [4].

В установившемся режиме канал рассматривается как отрезок волновой системы с определенными условиями, заданными на конце. При определенных соотношениях возникают резонансы трубы, причем в отличие от системы с сосредоточенными параметрами канал обладает бесчисленным множеством резонансов, частоты которых образуют гармоническую, или почти гармоническую, последовательность. При этом, при возбуждении колебаний на одном конце, вследствие отражения от другого конца в трубе образуется стоячая волна.

Для канала статора, когда он открыт с обоих концов, т.е. каналы ротора и статора совпадают, на длине канала укладывается целое число полуволн, или четное число четвертей волны, т.е. собственная частота канала в этом случае равна [5]

$$f_c = \frac{c_k}{2l_c}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1.1)$$

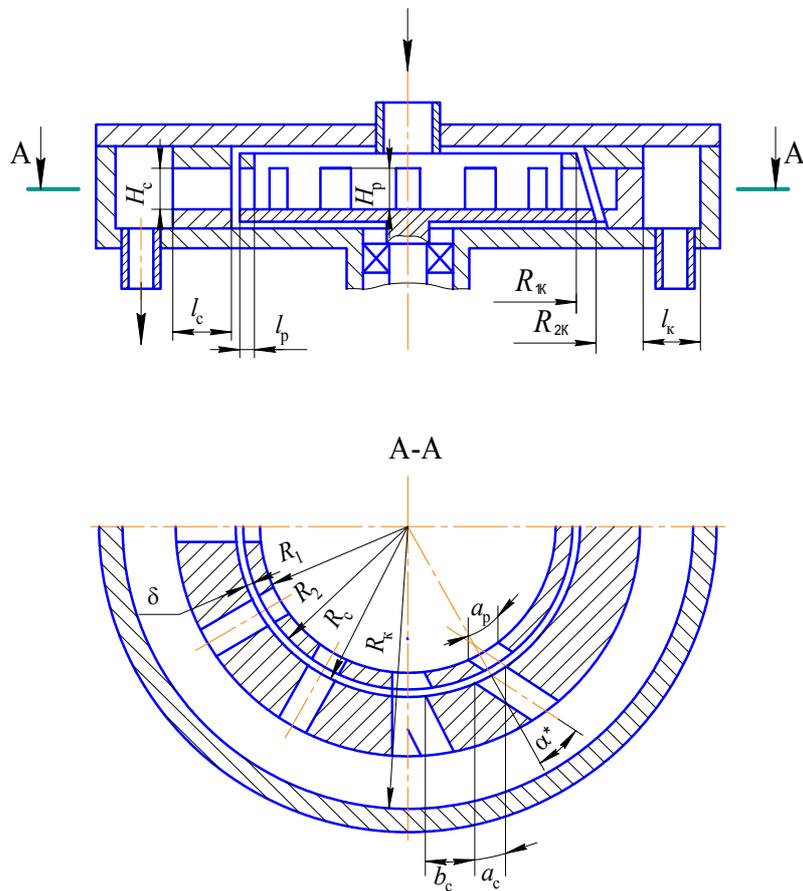


Рис. 1.1. Принципиальная конструкция роторного аппарата

Когда канал статора на входе закрыт промежутком между каналами ротора, то канал имеет собственные частоты, определяемые тем, что по длине трубы укладывается нечетное число четвертей длины волны. Собственные частоты определяются выражением [5]

$$f_c = \frac{c_k}{4l_c}, \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (1.2)$$

Рассмотрение канала в неустановившемся режиме состоит в том, что исследуется распространение по каналу статора импульса. Под импульсом понимается малая, по сравнению с длиной канала, область, в которой определенным способом задано измененное значение какой-либо из величин, характеризующих звуковое поле. Так, если идет речь о распространении по трубе импульса сжатия, то это значит, что по трубе передвигается со скоростью звука область, внутри которой давление выше атмосферного. Наибольшее значение для последующего имеют закономерности отражения импульсов. Если импульс сжатия отражается от закрытого конца канала, то после отражения он возвращается обратно также в виде импульса сжатия. Если отражение происходит от открытого конца, то импульс сжатия превращается в результате отражения в импульс разряжения.

Если описывать импульсы при помощи понятия избыточного давления, тогда при сжатии избыточное давление положительно, при разряжении – отрицательно.

Таким образом, в каналах статора возможна реализация двух рассмотренных случаев, следовательно, необходимо рассмотреть их подробнее и, если возможно, использовать возникающие эффекты в каналах статора для интенсификации химико-технологических процессов.

Основная частота колебаний, генерируемая роторным аппаратом при $z_p = z_c = z$, определяется выражением

$$f_{p.a} = nz / 60. \quad (1.3)$$

Частота резонансных колебаний определяется задающей системой – каналом статора, независимо от механизма возбуждения. Очевидно, резонанс возникает в случае равенства гармоник из выражений (1.1) – (1.2) частоте по формуле (1.3). Отметим, что в работе [6] описывается возможность возникновения нелинейного резонанса в объеме канала. В [6] показано, что нелинейные резонансы возникают на удвоенной частоте, определяемой выражениями (1.1) и (1.2). Для случая открытого канала с обеих сторон резонансная частота в этом случае определяется как

$$f_c = \frac{c_k}{4l_c}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (1.4)$$

а для канала закрытого с одного конца

$$f_c = \frac{c_k}{8l_c}, \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (1.5)$$

Физический смысл нелинейных резонансов заключается в том, что вторая гармоника попадает на одну из собственных частот (линейных резонансов) канала статора.

Таким образом, в случае возникновения условий для выполнения соотношений (1.1), (1.2), (1.4), (1.5) в канале статора возникает стоячая волна, а если соблюдается еще и равенство этих выражений выражению (1.3), в канале ротора возникает резонанс. Отметим, что конкретный результат применения зависимостей (1.1), (1.2), (1.4) или (1.5) должен быть подтвержден результатами экспериментального исследования.

Так как звуковые колебания, генерируемые в камере озвучивания, определяются выражением (1.3), то из этого следует очевидный вывод: для одновременного образования стоячих волн в канале статора и камере озвучивания необходимым условием (но не достаточным) является выражение, которое в первом приближении имеет вид

$$l_c = l_k. \quad (1.6)$$

1.2. МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ РЕЗОНАНСА НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РОТОРНОГО АППАРАТА

Рассмотрим неустановившийся процесс распространения импульсов давления в канале статора.

Начнем с момента, когда каналы ротора совпадают с каналами статора, импульс жидкости врывается в канал статора и создает в его начале импульс сжатия. Этот импульс, отразившись от открытого конца в виде импульса разряжения, возвращается к началу канала. Он производит различное действие, зависящее от скорости вращения ротора и времени пробега импульса вдоль канала, так как от соотношения этих величин зависит относительное положение каналов ротора и статора к моменту прихода импульса отраженного импульса. Возможны два различных случая.

В первом случае за время пробега импульса по каналу статора туда и обратно каналы статора и ротора совпадают. При этом импульс разряжения, так как импульс сжатия поменял знак при отражении от открытого конца, увеличивает перепад давления между ротором и статором.

Во втором случае, когда каналы ротора и статора не совпадают, импульс, отразившись от промежутка между каналами ротора и поменяв знак, возвращается к открытому концу канала, вновь отражается без потери знака и возвращается к началу канала. Если к этому времени каналы совпадают, то перепад давления уменьшается. Известно, что увеличение перепада давления положительно влияет на развитие импульсной акустической кавитации в роторном аппарате [7]. Таким образом, необходимо реализовать в роторном аппарате первый случай воздействия импульса давления.

Время, когда каналы статора закрыты, определяется выражением

$$\dot{t} = \frac{a_2 + b_p}{\omega R_2}. \quad (1.7)$$

Время пробега импульса по длине канала статора в один конец

$$\ddot{t} = \frac{l_c}{c}. \quad (1.8)$$

Условие возникновения процесса увеличения перепада давления определяется соотношением

$$\dot{t} / \ddot{t} = 2, 6, 10, \dots, 4k + 2, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1.9)$$

Подчеркнем, что в (1.8) используется скорость звука для двухфазной среды, так как не корректно принимать скорость звука для капельной жидкости из-за того, что в канале статора за счет звукового воздействия и кавитации образуется газожидкостная среда и необходимо учитывать значительное снижение скорости звука.

1.3. МЕХАНИЗМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ СТОЯЧИХ ВОЛН

Стоячая волна представляет собой сумму двух бегущих волн равной амплитуды, распространяющихся во взаимно противоположных направлениях.

Амплитуда давления стоячей волны равна удвоенной амплитуде падающей волны, а так как энергия пропорциональна квадрату амплитуды, то средняя плотность энергии в ней соответственно в четыре раза больше плотности энергии в падающей волне, что является одним из преимуществ стоячих волн, возникающих в аппарате, по сравнению с бегущей волной.

Установлено, что в поле стоячих волн частицы движутся под действием радиационного давления [8]. Показано, что в стоячей звуковой волне на шарик действует сила, вызываемая давлением звука. Эта сила для узлов и пучностей колебаний равна нулю и достигает максимума между ними, причем по обе стороны от пучности колебаний сила направлена к этой пучности: отсюда следует важный вывод, что под действием радиационного давления частицы должны перемещаться в пучности колебаний.

Анализ действия радиационной силы показывает, что частицы с плотностью большей, чем плотность среды, движутся в пучности колебаний стоячей волны, а частицы с плотностью меньшей, чем плотность обрабатываемой среды, движутся к узлам колебаний.

К аналогичному выводу пришли авторы работы [9], которые уточнили уравнение движения, введя в уравнение вторую

производную. Как показано в работе [8], для каждого размера частиц имеется определенная частота, ниже которой частицы успевают полностью следовать за звуковыми колебаниями среды. В определенной области частот частицы различной величины имеют различные амплитуды колебаний, что приводит к взаимным столкновениям частиц.

Следует упомянуть о влиянии размеров суспензированных частиц, находящихся в поле стоячей волны на скорость процессов скопления и столкновения частиц.

Ангерер [10] поставил следующий опыт. Стеклообразные и пробковые шарики подвешивались на нитях в воде, в которой возбуждается стоячая волна. При этом шарики собирались в местах пучностей колебаний стоячей волны. Кроме того, наблюдалось накопление мельчайших пузырьков воздуха, которые возникли в результате кавитации в пучностях давлений.

Показано [8], что в стоячей звуковой волне вектор скорости движения среды направлен к пучностям давления при повышении давления и от них при понижении давления.

Анализируя движение частиц в поле стоячей волны, можно сделать важные выводы о механизме интенсификации массообменных процессов, проводимых в этом поле. Вдоль стоячей волны частицы ускоряются при движении к пучностям давления и, наоборот, замедляются при приближении к узлам давлений. Это то ускоренное, то замедленное движение частиц в поле стоячей звуковой волны увеличивает скорость обтекания частиц, что способствует интенсификации массообменных процессов. Вследствие того, что максимальная скорость потока жидкости в канале статора аппарата имеет величину 10...15 м/с, скорость звуковой волны ≈ 140 м/с, очевидно, что за время прохождения частицы через аппарат она многократно подвергается воздействию падающей и отраженной волн. Это обстоятельство должно еще больше ускорять процесс массообмена.

Другой важный момент вытекает из положения о том, что если плотность среды больше плотности частиц, то они стремятся к узлам колебаний и, наоборот, если плотность среды меньше, чем плотность частиц, то частицы стремятся к пучностям колебаний. Так как в роторном аппарате возникает интенсивная кавитация, то в объеме среды в канале статора появляется множество мелких кавитирующих пузырьков, которые стремятся к узлам колебаний.

В свою очередь твердые частицы растворяющегося вещества стремятся к пучностям стоячей волны. Все это должно приводить к увеличению числа столкновений частиц с кавитирующими пузырьками. Пузырьки, захлопываясь на твердых частицах, очевидно, должны вызывать сильное их диспергирование, вследствие локального повышения давления и температуры, а также кумулятивных микроструек жидкости, возникающих при несферических захлопываниях кавитационных пузырьков. Таким образом, кроме увеличения поверхности контакта фаз за счет дробления частиц, кавитирующие пузырьки должны "срывать" диффузионный пограничный слой.

Таким образом, возбуждение в роторном аппарате стоячих волн должно интенсифицировать процесс массообмена.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ, КАВИТАЦИОННЫХ, РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РОТОРНЫХ АППАРАТАХ

2.1. ОПИСАНИЕ ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК, АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1.1. ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ

Для проведения экспериментального исследования гидравлических, акустических характеристик аппарата, а также для исследования кинетики массопереноса при растворении на примере природной соли NaCl и диспергирования эмульсола для приготовления смазочно-охлаждающей жидкости была сконструирована экспериментальная установка (кафедра КАХП, МИХМ, Москва) производительностью до $17,5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Установка, схема которой дана на рис. 2.1 содержит следующие основные части: вибродозатор 1, емкости предварительного смешения 2 и 7, ротаметр 4, вентили 5, 9–11, 15, 17, трубка замера уровня 3, насос 6, расходомер контроля количества подаваемой в роторный аппарат жидкости 8, роторный аппарат 14, электродвигатель привода роторного аппарата 16, манометры 12 и 13, дозатор 18.

Во время работы экспериментальной установки емкость 2 при помощи крана 5 заполняется водой с контролем, посредством ротаметра 4. Уровень жидкости в емкости 2 контролируется с помощью стеклянной уровневой трубки 3. Открытием крана 15 полости аппарата освобождаются от воздуха.

После заполнения системы жидкостью, включается привод роторного аппарата, состоящий из двигателя постоянного тока П-32 16 и муфты МУВП 19. Двигатель позволяет плавно изменять число оборотов ротора роторного аппарата от 400 до 3000 об/мин. После включения аппарата включается насос 6, и жидкость начинает циркулировать в замкнутой системе.

Основные части аппарата: ротор и статор с направленными от центра к периферии каналами (щелями) в них, число каналов в роторе $Z_p = 10$, в статоре $Z_c = 50$, выбрано кратным пяти, чтобы они перекрывались все одновременно. Это необходимое условие для синфазной работы модулятора.

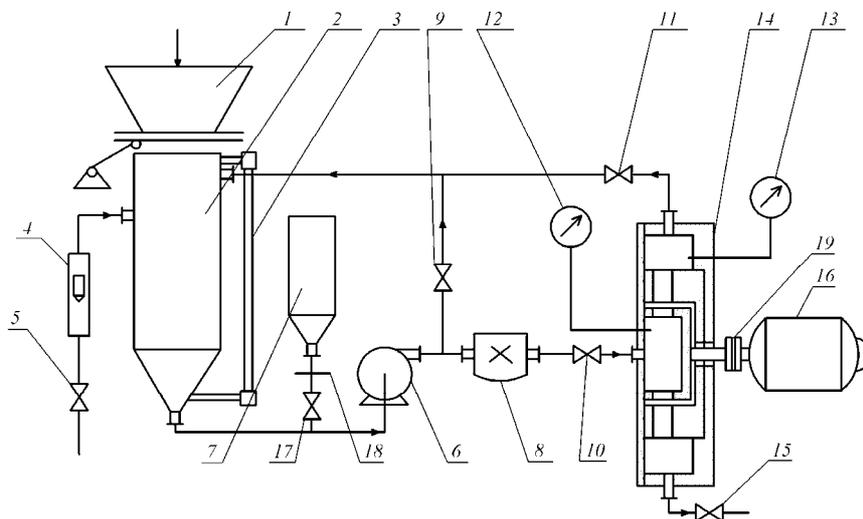


Рис. 2.1. Принципиальная схема экспериментальной установки производительностью 17,5 м³/ч (МИХМ)

Как показано работами предыдущих авторов [7, 11 – 13] на акустические и гидродинамические характеристики аппарата сильное влияние оказывает величина радиального зазора между ротором и статором. С целью изучения этого влияния ротор и статор выполнены коническими, что позволяло изменять зазор от $0,05 \cdot 10^{-3}$ м до $0,3 \cdot 10^{-3}$ м.

Некоторые основные параметры установки:

Радиус конического ротора (средний) –	0,1 м
Радиус камеры озвучивания	– 0,2 м
Длина наклонного канала статора	– 0,057 м
Ширина канала ротора	– 0,005 м
Ширина канала статора	– 0,0025 м
Угол наклона канала статора	– 60°
Давление в полости ротора	– $(1 \dots 5,5) \cdot 10^5$ Па
Расход по жидкости	– $(2,2 \dots 4,7) \cdot 10^{-3}$ м ³ /с
Скорость вращения ротора	– $(43 \dots 314)$ с ⁻¹
Мощность электродвигателя	– 4 кВт.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась также полупромышленная установка роторного аппарата, которая была изготовлена и смонтирована на кафедре ТММ и ДМ ТГТУ производительностью до 4,5 м³/ч (рис. 2.2).

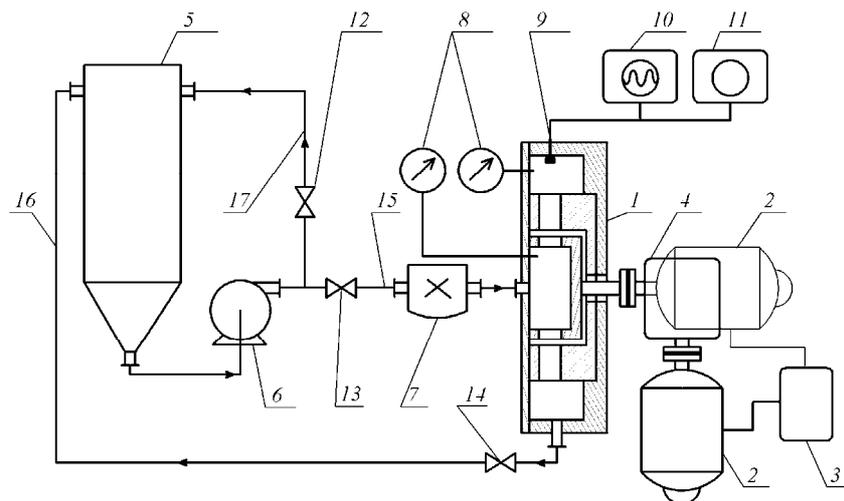


Рис. 2.2. Принципиальная схема экспериментальной установки производительностью до 4,5 м³/ч (ТГТУ)

- 1 – роторный аппарат; 2 – электродвигатель; 3 – блок питания;
 4 – червячный редуктор; 5 – емкость; 6 – центробежный насос; 7 – расходомер;
 8 – манометры; 9 – гидрофон; 10 – осциллограф; 11 – анализатор гармоник;
 12–14 – запорные вентили; 15, 16 – напорные магистрали; 17 – линия байпаса

Конические ротор и статор предусмотрены заменяющимися для возможности варьирования количества каналов. Вал аппарата приводится во вращение через втулочно-пальцевую муфту МУВП электродвигателем постоянного тока марки 2ПБ-112. Для повышения крутящего момента при низких скоростях вращения предусмотрен вариант подключения двигателя

через червячный редуктор типа 80-440-53-112. Для плавного регулирования оборотов вращения электродвигатель подключен через блок питания постоянного тока с регулировкой стабилизированного выходного напряжения. Изменение давления в полостях ротора и статора фиксируется образцовыми манометрами. Расход жидкости контролируется с помощью расходомера ОСВ-32. Для оценки характера изменения звукового давления в рабочей камере аппарата используется гидрофон из титаната бария (BaTiO), установленный напротив канала статора с возможностью регулирования расстояния до канала. Данный датчик подключен к запоминающему осциллографу С8-12 и анализатору гармоник С5-3. Для фотографирования применялся цифровой фотоаппарат с графическим разрешением матрицы 5 Мп.

Экспериментальная установка (рис. 2.2) работает следующим образом. Рабочая жидкость подается из емкости 5 по напорной линии 15 центробежным насосом 6 типа К45/30. Расход подаваемой в аппарат жидкости регулируется при помощи запорного вентиля 12 системы байпаса и контролируется при помощи расходомера 7. Давление в полости ротора регулируется вентилем 13. Давление в статоре аппарата изменяется при помощи запорного вентиля 14. После обработки жидкость по напорной линии 16 поступает обратно в емкость 5.

Основные параметры установки следующие:

Число каналов в роторе	– 5, 10, 20
Число каналов в статоре	– 5, 10, 20
Радиус ротора	– 0,1 м
Радиус камеры озвучивания	– 0,2 м
Длина радиального канала статора	– 0,025 м
Длина канала ротора	– 0,01 м
Ширина канала статора	– 0,002 м
Ширина канала ротора	– 0,002 м
Давление в полости ротора	– (1...2,9) · 10 ⁵ Па
Давление в камере озвучивания	– (0,3...3) · 10 ⁵ Па
Объемный расход	– 4 · 10 ⁻³ м ³ /с
Мощность электродвигателя аппарата	– 2,2 кВт
Радиальный зазор между ротором и статором	– (0,1...0,3) · 10 ⁻³ м.

2.1.2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Основной гидравлической характеристикой роторного аппарата является коэффициент гидравлического сопротивления модулятора роторного аппарата. Его величину определяют по известной формуле

$$\xi = \frac{2\Delta P < S >^2}{Q^2 \rho} \quad (2.1)$$

Среднее проходное сечение одного канала определяют за один период, как это обычно делают для усреднения периодических функций:

$$\langle S_0 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt.$$

При перекрытии каналов прямоугольного сечения с одной высотой [7]

$$\langle S_0 \rangle = \frac{Ha_c a_2}{a_p + b_c} \quad (2.2)$$

Полное проходное среднее сечение модулятора определяется выражением

$$\langle S \rangle = \langle S_0 \rangle z_c \quad (2.3)$$

Перепад давления между полостью ротора и камеры озвучивания определяется с помощью образцовых манометров 12, 13 на установке изображенной на рис. 2.1 и 8 – на установке рис. 2.2.

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления необходимо знать зависимости объемного расхода от перепада давления между полостью ротора и камерой озвучивания при различных угловых скоростях вращения ротора и величинах радиального зазора между ротором и статором.

Объемный расход определялся в установке (рис. 2.1) с помощью расходомера марки УВК 32. В случае установки, смонтированной в ТГТУ (рис. 2.2), расход измерялся расходомером марки ОСВ-32.

Угловая скорость вращения ротора определялась с помощью стробоскопа марки СТ 28.

Эксперименты проводились в условиях поддержания постоянных давлений в камере озвучивания и постепенном увеличении давления в полости ротора, используя байпасные линии и регулировочные вентили на входе и выходе из роторного аппарата.

Мощность, потребляемая роторным аппаратом, измерялась по методике использовавшейся в [13] и рекомендованной в [14].

Вращающий момент на валу ротора пропорционален магнитному потоку и току в обмотке якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

$$M_{кр} = K_m \Phi I_a, \quad (2.4)$$

где $M_{кр}$ – вращающий момент на валу электродвигателя, Н·м; K_m – кратность пускового момента; Φ – магнитный поток, Вб; I_a – ток в обмотке якоря, А.

Приняв магнитный поток в электродвигателе постоянным, получаем из (2.4)

$$M_{кр} = C_m I_a. \quad (2.5)$$

Коэффициент C_m определяется выражением

$$C_m = 9,55 (U_n - I_{ня} R_a) / n_n, \quad (2.6)$$

где U_n – нормальное напряжение, В; $I_{ня}$ – нормальный ток якоря, А; R_a – сопротивление обмотки якоря, Ом; n_n – нормальная частота вращения вала электродвигателя, мин⁻².

Ток якоря измерялся амперметром модели М42100, напряжение – вольтметром модели М42100.

Потребляемая мощность определяется известным выражением

$$N_{р.а} = M_{кр} \omega.$$

2.1.3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ И РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Для подтверждения адекватности полученных в главе 1[1] моделей течения несжимаемой и сжимаемой среды в каналах модулятора необходимо сравнить теоретические зависимости скорости и ускорения жидкости за период генерации динамических колебаний – период процесса открывания-закрывания канала статора, с экспериментальными данными. Сравнивается осциллограмма звукового давления, генерируемого роторным аппаратом $P(t)$ с теоретическим графиком изменения dv_c / dt , так как согласно [7, 11 – 13]

$$P(t) = \rho \sqrt{\frac{S_c}{2\pi}} \frac{dv_c}{dt}. \quad (2.7)$$

Для изучения динамического давления, а также в дальнейшем и кавитационных явлений, использовался гидрофон из титаната бария ВаТiО, установленный напротив выхода из канала статора, с возможностью перемещения в радиально направлении. Для устранения влияния на показания датчика вибраций корпуса роторного аппарата держатель гидрофона установлен в демпфирующем сальнике из резины так, что он изолирован от корпуса.

В гидрофоне использована таблетка из титаната бария, так как коэффициент электромеханической связи, равный корню квадратному из отношения генерируемой электрической энергии к подводимой энергии других колебаний, у этого пьезокерамического материала в три раза больше чем у кварца.

Как отмечается предыдущими исследованиями [7, 15], положение датчика в пространстве не влияет на форму получаемых импульсов. Измерительная часть гидрофона имеет вид цилиндра с диаметром 8 мм и длиной образующей 10 мм. Линейные размеры гидрофона не вносят искажений в акустическое поле, если они меньше $\frac{1}{4}$ длины волны в исследуемой среде [16]. В работе [7] доказано, что в газожидкостной среде, образующейся в рабочих зонах роторного аппарата, при установке на гидрофон накладки диаметром 18 мм и толщиной 3 мм амплитудно-частотные зависимости датчика практически не изменялись. Кроме того, отметим, что наибольшая основная частота, генерируемая роторным аппаратом, не превышает в нашем случае единиц килогерц, а собственная частота механического резонанса использованного гидрофона лежит в диапазоне сотен килогерц.

Испытания на установке, изображенной на рис. 2.2, проводились следующим образом.

В рабочую емкость 5 заливается обрабатываемая жидкость объемом 40 литров. Далее из полостей ротора и статора аппарата удаляются остатки запертого воздуха. Для этой цели в верхней точке аппарата предусмотрен спускной вентиль, который также может быть использован для пробных отборов обрабатываемой жидкости. В момент запуска аппарата велика вероятность, что канал ротора может быть перекрыт стенкой статора. Таким образом, во избежание перегрузки насоса 6 первым запускается электродвигатель аппарата 2. В следующий момент происходит запуск насоса 6. Задаются минимально возможные обороты вращения вала электродвигателя 2. С помощью вентиля 12 системы байпаса выбирается расход обрабатываемой жидкости, фиксируется значение расхода при помощи расходомера 7. Вентильми 14 и 15 выставляется перепад давлений между ротором и статором. Величины давления в роторе и статоре фиксируются образцовыми манометрами. Далее производится 10 фотографий осциллограмм изменения динамического давления. Предварительно настройки осциллографа 10 производились таким образом, что на экране отображались 1 – 3 колебания давления на выходе канала статора, вызываемых открытием-перекрытием канала. Далее изменяется число оборотов вала электродвигателя на выбранную величину, и производится следующая серия фотографий осциллограмм. При этом поддерживается постоянный расход жидкости по показаниям расходомера 7 при помощи запорного вентиля 12. Также производится контроль значений давления в полости ротора и статора при помощи образцовых манометров 8. Регулирование изменившихся величин давления происходит вентильми 13 и 14 для ротора и статора, соответственно. Во избежание влияния температурного

воздействия, после каждого двух опытов производилось полное опорожнение аппарата и заливка новой водопроводной воды. Полученные экспериментальные данные обрабатываются статистическими методами.

Аналогично проводились исследования гидродинамики потоков и на установке, изображенной на рис. 2.1.

Для подтверждения возникновения стоячей волны в камере роторного аппарата датчик давления перемещался по радиусу по ширине камеры и проводились такие же действия в каждой фиксированной точке. Спектральный анализ колебаний в роторном аппарате может производиться двумя способами: с помощью анализатора гармоник С 5-3 и методики, разработанной специально для анализа колебаний среды при отсутствии приборов подобного типа и позволяющей получить не менее информативные результаты.

Поэтому приведем эту методику, использованную в исследовании акустических колебаний в установке с наклонными каналами в статоре [2].

Для исследования поля упругих колебаний необходимо знать спектральную плотность, являющуюся важнейшей одномерной характеристикой случайного процесса и описывающей его частотный состав.

Данные для обработки задают обычно в виде записей случайного процесса, полученного с датчиков. Выбор участка записи, подлежащего анализу, определяется, прежде всего, поставленной задачей.

Исходными данными для обработки в нашем случае являются осциллограмма давления, полученные с помощью гидрофона. Представление сигнала в цифровой форме предполагает выполнение двух операций: дискретизация по времени и квантование по уровню.

Дискретизация заключается в определении точек, в которых должны быть произведены выборки. При численной обработке данных эта операция производится через равные интервалы времени h .

Чтобы дискретная реализация содержала все те же частоты, что и исходный непрерывный сигнал, на каждый цикл соответствующего колебания должно приходиться не менее двух отсчетов. Наиболее высокая частота, которая может быть выделена при дискретизации со скоростью $1/h$ отсчетов в секунду, равна $1/5h$ Гц. Более высокие частоты будут свернуты в диапазоне $0 \dots 0,5h$ Гц и смешаются с более низкими частотами этого диапазона.

Граничная частота

$$f_c = \frac{1}{2h}$$

называется частотой Найквиста или частотой свертывания. Пусть f_d – наиболее высокая частота анализируемого процесса. Тогда интервал дискретизации надо выбирать так, чтобы

$$h = \frac{1}{2f_c} \leq \frac{1}{2f_d}.$$

Рекомендуется выбирать $f_c \geq 1,25f_d$. В нашем случае $f_d = 6500$ Гц, $H=1$ мм осциллограммы по оси $x = 1 / 13000$ с. При незначительном h точки, в которых должны быть произведены выборки, определяются соотношением

$$t_n = t_0 + nh, \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

где t_0 – начальный момент времени; $N = \frac{T}{h}$ – объем выборки; T – время наблюдения.

Квантование есть преобразование отсчетов в дискретную форму. Бесконечную последовательность возможных значений непрерывного процесса можно приближенно описать с помощью уровней квантования. Истинным значением исходного непрерывного сигнала будут соответствовать наиболее близкие к ним уровни квантования.

Таким образом, исходные данные в результате дискретизации и квантования непрерывного процесса могут быть представлены в виде

$$x_n = x(t_0 + nh), \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

Для упрощения последующих расчетов целесообразно провести центрирование процесса, т.е. привести процесс к нулевому среднему значению

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n.$$

Рассчитываемая по этой формуле величина \bar{x} представляет собой несмещенную оценку истинного среднего значения m_x процесса $x(t)$.

Тогда последовательность $\{x_{*n}\}$ значений центрированной функции $x_{*n}(t)$ определяется соотношением

$$x_{*n} = x_n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n.$$

Следующий этап – вычисление автокорреляционной функции. Автокорреляционная функция может оказаться эффективным средством при выявлении скрытых периодичностей, содержащихся в случайном процессе.

Оценка автокорреляционной функции центрированного эргодического процесса при сдвиге rh находится в виде

$$\hat{R}_r = \hat{R}_{x^*}(rh) = \frac{1}{N-z} \sum_{n=1}^{N-z} x_{*n} x_{*n+r}, \quad r = 0, 1, 2, \dots, m,$$

где r – номер шага; m – максимальное число шагов.

Число шагов m определяется

$$m = \frac{1}{Be \cdot h},$$

где Be – желаемая эквивалентная разрешающая способность при расчетах энергетического спектра.

На практике принимают

$$m \leq \frac{N}{10}.$$

Полагая, что автокорреляционные функции \hat{R}_r распределены по нормальному закону, строим доверительные границы, в которых с заданной вероятностью находятся истинные значения оцениваемых величин:

$$P \left\{ z_{1-q/2} < \frac{\hat{R}_z - R_z}{\sqrt{D[\hat{R}_z]}} \leq z_{q/2} \right\} = 1 - q,$$

где q – задаваемый уровень значимости; R_r – истинное значение автокорреляционной функции; $D[\hat{R}_r]$ – дисперсия оценки автокорреляционной функции; $z_{q/2}$ – квантиль нормального распределения с уровнем $1 - q/2$.

Дисперсия оценки автокорреляционной функции определяется соотношением

$$D[\hat{R}_r] = \frac{1}{N-r} \sum_{l=-N+r}^{N-r} \left(1 - \frac{|l|}{N-r} \right) (R_l^2 + R_{l+r} R_{l-r}).$$

Поскольку истинное значение R_r неизвестно, при определении $D[\hat{R}_r]$ используются оценки R_r .

Пусть $q = 0,05$. По таблицам нормального распределения находим

$$z_{1-q/2} = z_{q/2} = z_{0,0025} = 1,96.$$

Тогда 95%-ный доверительный интервал для R_r имеет вид

$$\hat{R}_r - 1,96\sqrt{D[\hat{R}_r]} \leq R_r < \hat{R}_r + 1,96\sqrt{D[\hat{R}_r]}.$$

При численной оценке спектральной плотности процесса применяется стандартный метод, при использовании которого спектральная плотность выражается через преобразование Фурье автокорреляционной функции с последующим сглаживанием по частоте.

Сглаженная оценка спектральной плотности определяется формулой

$$G_k = G_{x*} \left(\frac{Kf_c}{m} \right) = 2h \left[\hat{R}_0 + 2 \sum_{r=1}^{m-1} D_r \hat{R}_r \cos \left(\frac{\pi r K}{m} \right) \right],$$

$$K = 0, 1, 2, \dots, m,$$

где K – порядок гармоники; D_r – сглаживающая весовая функция Хаппа,

$$D_r = D(rh) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \cos \frac{\pi r}{m}, & r = 0, 1, 2, \dots, m \\ 0, & r > m. \end{cases}$$

Значения G_k , отстоящие друг от друга менее чем на ширину полосы Be , коррелированы, так как она определяет разрешающую способность спектрального анализа.

95%-ный доверительный интервал ($q = 0,05$, $N/m = 10$) для спектральной плотности определяется в виде

$$0,625\hat{G}_k \leq G_k < 1,86G_k.$$

Отметим, что полученные результаты с помощью предложенной методики подтверждаются анализом акустического поля, проведенного с помощью анализатора гармоник.

2.1.4. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ КАВИТАЦИИ

Режим работы роторного аппарата, с точки зрения типа кавитации, возбуждаемой в рабочих зонах, характеризуется критериями кавитации. Более подробно эти режимы работы и критерии кавитации рассмотрены в работах [17, 18]. Остановимся только на выражении для этих критериев.

При небольших скоростях перекрытия каналов статора в них образуется пульсирующая кавитационная камера. Такой режим работы называется режимом гидродинамической кавитации и характеризуется критерием гидродинамической кавитации

$$\chi_r = \frac{2P_s}{\rho < v >^2} < 1, \quad (2.8)$$

где $< v > = \left[(Q / S_c z_c)^2 + \omega R_2^2 \right]^{0.5}$ – средняя скорость жидкости через один канал статора, м/с.

При определенном сочетании скорости перекрытия каналов и расхода, когда образующиеся кавитационные пузыри выносятся в камеру озвучивания, в случае роторных аппаратов с короткими каналами, присутствует режим акустической кавитации, который характеризуется критерием акустической кавитации

$$\chi_a = \frac{P_s}{|P_m|} < 1. \quad (2.9)$$

Существуют и другие выражения для критериев кавитации [19]. Наиболее интересным для практики является выражение для коэффициента кавитации, предложенное Стайлсом [20]. Для нашего случая он запишется в виде

$$K_c = \frac{(P_p - P_k)_{\text{кав}}}{P_k - P_v} = \frac{\Delta P_{\text{кав}}}{P_k - P_v}. \quad (2.10)$$

Это выражение удобно для использования тем, что входящие в него параметры определяются непосредственно экспериментальным исследованием.

Величину критерия кавитации Стайлса легко регулировать изменением величины давления в полости камеры или ротора, что особенно важно для получения требуемого режима работы роторного аппарата при его эксплуатации в промышленных условиях.

Связь между критерием акустической кавитации и коэффициентом кавитации Стайлса определяется из выражений (2.9) и (2.10) и записывается в виде

$$\chi_a = \frac{P_p}{|P_m| (1 + K_c)}. \quad (2.11)$$

Если необходимо произвести сравнение K_c с критерием гидродинамической кавитации, то учитывая (2.1) и (2.8), получаем выражение

$$K_c = \frac{\xi_r}{\chi_r}. \quad (2.12)$$

На основании рассмотренных критериев, характеризующих кавитацию, можно рекомендовать использовать выражения (2.9) и (2.11) для анализа закономерностей работы роторного аппарата в режиме акустической импульсной кавитации при теоретическом (2.9) и экспериментальном исследовании (2.11), а связь между этими критериями легко установить по выражению (2.12).

В настоящее время при изучении возникновения, развития и исчезновения кавитации используют следующие методы:

- а) фотографирование и высокоскоростная съемка;
- б) гидравлические, основанные на измерении параметров потока (расхода, скорости, перепада давлений и т.п.);
- в) акустические;
- г) электрические (омические, электроемкостные);
- д) радиоактивные.

Визуальные наблюдения фотографирование и киносъемка позволяют достаточно точно определить стадии развития кавитации. Однако это требует дополнительной переделки роторного аппарата – обеспечения прозрачных стенок, освещения каналов с помощью лазеров. Таким образом, этот метод исследования пригоден только для лабораторного исследования.

Гидравлические методы основаны на фиксации изменения характеристик потока, наблюдаемого при возникновении и развитии кавитации. Обычно используют экспериментальные зависимости расхода Q от перепада давлений ΔP или коэффициента сопротивления ξ от числа кавитации χ_r .

Эксперименты проводятся в условиях поддержания постоянных давлений, либо в камере и постепенном увеличении давления в роторе, либо при постоянном значении давления в роторе и постепенном уменьшении давления в камере при постоянном значении температуры потока жидкости.

Так как кавитационному течению предшествуют большие скорости движения жидкости, при котором $Re > 10^3$, то бескавитационный режим течения на графиках зависимости Q от $\sqrt{\Delta P}$ характеризуется прямыми наклонными линиями,

которые отражают область автомодельной турбулентности, когда ξ не зависит от Re . Начало возникновения кавитации определяется этим методом по точкам начала отклонения зависимости $Q = f(\sqrt{\Delta P})$ от прямых линий [20–22], а по режимным параметрам, соответствующим этим точкам, вычисляют критические значения числа кавитации.

На рис. 2.3 приведен характерный график изменения Q от $\sqrt{\Delta P}$ (установка на рис. 2.1).

Как видно, правая часть кривой, начиная от точки перегиба, имеет другой характер зависимости: увеличение ΔP не дает существенного роста расхода, а начиная с определенного перепада давлений, расход остается постоянным. Точка a является точкой начала возникновения кавитации, регистрируемой гидравлическим методом.

При акустических методах исследования обычно измеряется излучение звуковых импульсов различной частоты и интенсивности, возникающих на различных стадиях кавитации.

В настоящее время используется несколько методов акустических исследований:

1. Измерение колебаний давления в жидкости при помощи гидрофонов, позволяющих получить близкие к истинным спектры кавитационного шума, в том числе и дискретные составляющие. Этим методом измеряют звуковые и ультразвуковые частоты, начиная от десятков герц до сотен килогерц. Высокая чувствительность гидрофонов позволяет не использовать предварительные усилители, что снижает искажение сигнала.

2. Фиксация изменений поглощения и рассеивания акустических или в газожидкостной смеси и ультразвуковые методы. Они дают достаточно хорошие результаты, но отличаются большой сложностью: используется дорогая и многоэлементная аппаратура и требуется повышенная точность проведения эксперимента.

При выборе метода акустических исследований кавитации ставится задача определения характерных признаков кавитационного шума, которые изменяются по мере развития кавитации. При этом нет необходимости в определении абсолютных величин кавитационного шума, достаточно знания лишь относительных величин.

В электрических методах используется изменение электрических свойств жидкости (омическое сопротивление, емкость и др.) вследствие изменения газосодержания потока при различных стадиях развития кавитации. Недостаток его – трудность в определении начала возникновения кавитации.

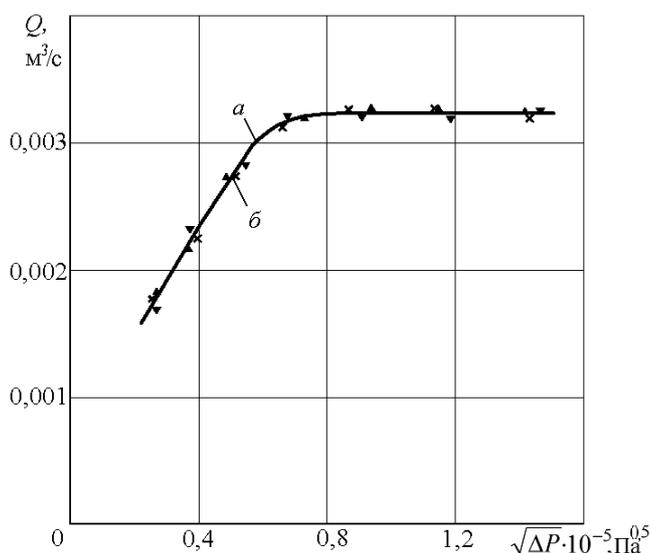


Рис. 2.3. Зависимость объемного расхода от $\sqrt{\Delta P}$ при различных скоростях вращения ротора:
 $\delta_a = 0,01$; $x - \omega = 44 \text{ с}^{-1}$; $\nabla - \omega = 125 \text{ с}^{-1}$; $\Delta - \omega = 251 \text{ с}^{-1}$

Радиоактивные методы основаны на том, что поглощательная способность жидкости по отношению к частицам радиоактивного излучения сильно зависит от ее плотности. Его недостатком является повышенная опасность для человека и требуется очень дорогостоящая и крупногабаритная аппаратура.

Для исследования явления кавитации в роторном аппарате из всех вышеуказанных методов наиболее приемлемы гидравлический и акустический методы, требующие менее дорогостоящей и громоздкой аппаратуры и обладающие достаточной точностью и надежностью получаемых результатов.

Как показали наши исследования и результаты других авторов [23–24] начало кавитации, обнаруженное акустическим методом и соответствующее появлению на осциллографе первых всплесков давления от захлопывания пузырьков (т. б) (рис. 2.3), не соответствует точке начала кавитации, определенной по отклонению расходных характеристик от квадратичного закона (т. а). Началу отклонения расходных характеристик от квадратичного закона соответствует достаточно развитая кавитация, т.е. гидравлический метод менее точен, чем акустический. Исходя из этого, дальнейшие эксперименты проводились с использованием акустического метода исследования кавитации с помощью гидрофона, установленного в камере озвучивания.

Сигнал с датчика подавался на электронный осциллограф типа С1-18, с экрана которого производилось фотографирование полученных импульсов давления.

Экспериментальное исследование кавитации проводилось при следующих угловых скоростях вращения ротора ($\omega = 44 \text{ с}^{-1}$; $\omega = 94 \text{ с}^{-1}$; $\omega = 125 \text{ с}^{-1}$; $\omega = 161 \text{ с}^{-1}$; $\omega = 225 \text{ с}^{-1}$; $\omega = 251 \text{ с}^{-1}$) на установке рис. 2.1.

Частота вращения двигателя регулировалась изменением напряжения питания и контролировалась стробоскопом марки СТ-32.

Опыты проводились сериями, каждая из которых имела фиксированными вес величины, кроме одной, изменяющейся во время проведения серии: при фиксированном зазоре устанавливались определенная частота вращения ротора аппарата, давление и определялись расход жидкости через аппарат Q и относительная величина кавитационных импульсов давления. Затем изменялось давление при сохранении скорости вращения ротора и зазора и также измерялись Q и относительная величина кавитационных импульсов, В каждой серии экспериментов давление в полости аппарата изменялось от $(1,5 \dots 5,5) \cdot 10^{-5}$ Па.

Аналогичным образом проводились эксперименты на установке, изображенной на рис. 2.2, с использованием более совершенных приборов, описанных в 2.1.1. При этом, естественно, диапазон изменения давления в полости ротора и камере озвучивания был другим $P = (0,5 \dots 3,5) \cdot 10^{-5}$ Па. Угловая скорость ротора изменялась в пределах $40 \dots 314$ с⁻¹.

Как в первом, так и во втором случае каждый параметр определялся не менее 10 раз. Полученные результаты обрабатывались статистическим методом.

2.1.5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО РАСТВОРЕНИЮ ПРИРОДНОЙ СОЛИ В РОТОРНОМ АППАРАТЕ

Исследование кинетики растворения в роторном аппарате проводилось на кристаллах природной соли следующего химического состава:

NaCl	– 89,4 %
Ca	– 0,89 %
Mg	– 0,96 %
SO ₄	– 1,79 %
влага	– 0,80 %
нерастворимый осадок	– 6,16 %

Гранулометрический состав соли определен ситовым анализом:

10 мм	– 4 %
10...7 мм	– 0,8 %
7...5 мм	– 0,9 %
5...3 мм	– 1,2 %
3...2,5 мм	– 1,9 %
2,5...2 мм	– 3,4 %
2,0...1,6 мм	– 3,7 %
1,6...1,0 мм	– 21,9 %
1,0...0,5 мм	– 31,4 %
0,5...0 мм	– 30,8 %

Исследование проводилось на установке, представленной на рис. 2.1, при давлении в камере $P_k = 2,6 \cdot 10^5$ Па. Число оборотов ротора изменялось от 400 до 3000 об/мин. Температура эксперимента изменялась незначительно $t^\circ = 20 \dots 21$ °С. Для подтверждения интенсифицирующего действия кавитации эксперименты проводились также при давлении в камере $P_k = 4,5 \cdot 10^5$ Па, при котором наблюдался докавитационный режим работы аппарата, а также при $P_k = 1,5 \cdot 10^5$ Па в режиме суперкавитации.

Эксперимент проводился в следующей последовательности: сначала система заполнялась водой, включался привод роторного аппарата, затем включается насос подачи жидкости, после стабилизации режима работы установки одновременно включается дозатор и секундомер, пробы отбирались через равные промежутки времени. Для определения концентрации раствора соли использовался набор стандартных денсиметров № 19 (ГОСТ 1500–57), имеющих диапазон измерения плотности $0,7 \dots 1,84$ г/см³ при температуре раствора 293 К.

2.1.6. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ

Исследование процесса диспергирования эмульсола для получения СОЖ проводилось на экспериментальной установке, описанной в 2.1.1 (рис. 2.1).

Методика экспериментального исследования заключается в следующем. Вода из емкости 2 и эмульсол из емкости 7 подаются насосом через дозатор 18 на вход аппарата. Проба получившейся эмульсии отбирается через определенные промежутки времени из крана 15. Эмульсия циркулирует по замкнутому контуру.

Дисперсность эмульсии характеризовалась среднеарифметическим диаметром частиц.

Размеры частиц измерялись с помощью микроскопа МБИ-15. Для получения достоверных данных в каждом эксперименте оценивается диаметр менее $800 \dots 1000$ частиц. Капли эмульсии из взятых проб наносятся на предметные стекла и затем производится фотографирование с помощью фотонасадки. Дисперсность полученной эмульсии осуществляется с помощью объект-микрометра ОМП методом проецирования негативного изображения на экран и затем производятся измерения частиц дисперсной фазы.

Температура дисперсионной среды и получаемой СОЖ поддерживается в пределах $20 \dots 21$ °С.

2.1.7. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ПОЛУЧАЕМОЙ СОЖ НА СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для сравнения эффективности СОЖ, полученной на роторном аппарате, на существующем оборудовании проводились испытания для установления зависимостей износа резца от времени и величины шероховатости.

Вопросы создания экспрессных методов предварительной оценки технологических свойств СОЖ подробно освещены в работах [25–26]. Все методы делятся на две большие группы.

Первая группа – это методы, не связанные с процессом обработки резанием. СОЖ регистрируется по показателям, снимаемым с машин трения.

Вторая группа – это методы, в которых СОЖ ранжируется с использованием оценок функциональных свойств СОЖ или отдельных параметров функционирования системы резания (составляющих силы резания, износа и стойкости инструментов, шероховатости обрабатываемых поверхностей и т.д.) в условиях процесса резания.

Анализ результатов испытаний СОЖ на машинах трения [26] позволил сделать вывод о неприменимости их для оценки технологических свойств СОЖ из-за часто противоположных результатов испытаний с результатами испытаний СОЖ на металлорежущих станках. Поэтому процесс резания является необходимым условием получения достоверного результата для определения технологических свойств СОЖ.

Испытания СОЖ проводятся по методике, описанной в работе [26].

Основные серии испытаний проводятся на скорости резания, обеспечивающей среднюю стойкость инструментов, соответствующую минимальной себестоимости выполнения операции обработки резанием. Подача и глубина резания соответствуют условиям режима резания полустачечных операций.

Опыты проводятся на токарном станке с высотой центров 200 мм. Число оборотов шпинделя станка регулируется с точностью в ± 5 оборотов. Контроль, отбор и заточка инструментов проводится в соответствии с требованиями стандартов. Предварительно, по рекомендациям назначается допустимый износ. Изучается зависимость износ-время для пяти режущих инструментов с испытываемой СОЖ на участке, составляющем около одной трети периода стойкости. Затем статистически обрабатывают результаты и отбирают 2-3 инструмента с минимальным отклонением величины износа от среднего; на них продолжали зависимости износ-время.

Приведенная методика позволяет снизить объем работ при проведении испытаний и получить более достоверные данные.

Износ режущих инструментов изучают на микроскопе типа БМИ-15 или БМ-4. Исследуются резцы из режущего материала Р18. В качестве заготовок берутся прутки из стали 45 диаметром 80...130 мм. При обработке сталей наблюдается ярко выраженный износ на передней и на задних главной и вспомогательной поверхности резца. Причем, износ на вспомогательной задней поверхности чаще всего служит причиной выхода из строя инструментов. Поэтому был выбран износ по задней вспомогательной поверхности, допустимая величина которого принималась равной 0,8 мм.

Режимы при опытах по установлению зависимости износ-время принимают: скорость резания 60 м/мин, подачу 0,2 мм/об; глубина резания – 1 мм.

Чистоту обработки определяли для стали 45 по поверхности, обработанной при глубине резания 1 мм, скорости резания 30, 40, 50, 60, 70 м/мин; подачи – 0,2 мм/об.

Шероховатость обработанной поверхности определяли с помощью профилометра-профилографа мод. 202. Полученные профилограммы обрабатывали известными методами [27] для получения данных по высотному параметру Ra – среднеарифметическому отклонению профиля.

2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СРЕДЫ В МОДУЛЯТОРЕ РОТОРНОГО АППАРАТА

2.2.1. ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ СРЕДЫ В МОДУЛЯТОРЕ РОТОРНОГО АППАРАТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Для подтверждения адекватности предложенных в пп. 2.1 и 2.2 работы [1] математических моделей течения несжимаемой и сжимаемой жидкости были использованы данные, полученные в [13]. Осциллограммы пульсационного давления для некоторых режимов работы роторного аппарата приведены на рис. 2.4.

Как следует из работ [7, 12] пульсационное давление пропорционально ускорению радиального течения жидкости (2.7), т.е.

$$P(t) \sim \frac{d\upsilon}{dt}.$$

Для качественной оценки адекватности предложенной модели течения сжимаемой среды необходимо сравнить результаты вычислений производной выражения (1.129), с учетом (1.130) и (1.22) из [1], с осциллограммами, полученными при соответствующих режимах работы роторного аппарата. Характер изменения $P(t)$ сильно зависит от величины линейной скорости ротора ωR_2 . Определим скорость ωR_2 , соответствующую прямому гидравлическому удару.

Условие прямого гидравлического удара имеет вид ($\theta \leq t_3$). Время процесса закрывания канала статора определяется как

$$t_3 = \frac{a_c}{\omega R_2}, \quad (2.13)$$

где $a_c = 2 \cdot 10^{-3}$ м [13].

Величина фазы гидравлического удара θ определяется из выражения

$$\theta = 2l_p/c, \quad (2.14)$$

где $l_p = 10^{-2}$ м [13]; $c \approx 140$ м/с [2].

Из выражений (2.13), (2.14) следует, что линейная скорость ротора, соответствующая началу возникновения прямого гидравлического удара, равна $\omega R_2 \approx 14$ м/с. Таким образом, согласно принятой модели, при $\omega R_2 \geq 14$ м/с должно наблюдаться качественное соответствие осциллограмм пульсационного давления и графиков, построенных используя выражение

$$v_c = v_p|_{r=r_2} S(t). \quad (2.15)$$

Для решения уравнения (2.15) определим K_k и χ . Масштаб скорости V определим по зависимости

$$V = \frac{Q}{z_p S_p}.$$

При $z_p = 20$, $S_p = 2 \cdot 10^{-5}$ м², $Q = 0,0012$ м³/с [13] средняя скорость течения в канале ротора равна $V \approx 3$ м/с. Следовательно, граница применимости формул (2.15) и (1.130) из работы [1] должна соответствовать значению $K_k \approx 4,7$. По данным [13] величина $\chi = 0,1$. Число Маха равно 0,02. Безразмерная величина v_1 имеет значение $v_1 = 1$.

Для построения графиков изменения ускорения течения обрабатываемой среды вначале проведено аналитическое дифференцирование выражения (2.15), с подстановкой (1.130) и (1.22) из работы [1]. Затем, используя программное обеспечение Maple 8.0, построены графики для периода времени процесса открывания–закрывания канала статора, соответствующие различным режимам работы роторного аппарата (рис. 2.5).

Анализируя рис. 2.4 и рис. 2.5 можно сделать вывод, что при значениях критерия $K_k > 1,1$ наблюдается удовлетворительное качественное совпадение характера изменения пульсационного давления и ускорения течения сжимаемой жидкости. При $K_k < 1,1$ характер изменения кривых на рис. 2.4, а значительно отличается от графика на рис. 2.5, а. Исходя из этого, можно предположить, что при $K_k < 1,1$ для описания течения среды в модуляторе роторного аппарата необходимо использовать модель движения несжимаемой жидкости. Для подтверждения этого предположения был построен график изменения ускорения обрабатываемой среды, используя математическую модель, предложенную в п. 2.1.5 работы [1]. Скорость радиального нестационарного течения несжимаемой жидкости в канале ротора определяется выражением в безразмерном виде (2.15) с учетом (1.73) и (1.22) из работы [1].

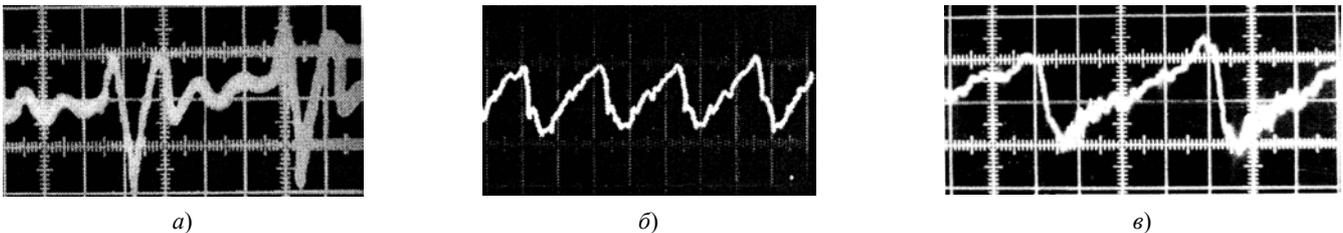


Рис. 2.4. Осциллограммы пульсационного давления в камере озвучивания роторного аппарата при $\delta_a = 0,05$; $l/a_p = 5$; $z_p = z_c = 20$ и значениях:
 а – $K_k = 0,3$; б – $K_k \approx 1,1$; в – $K_k \approx 1,3$

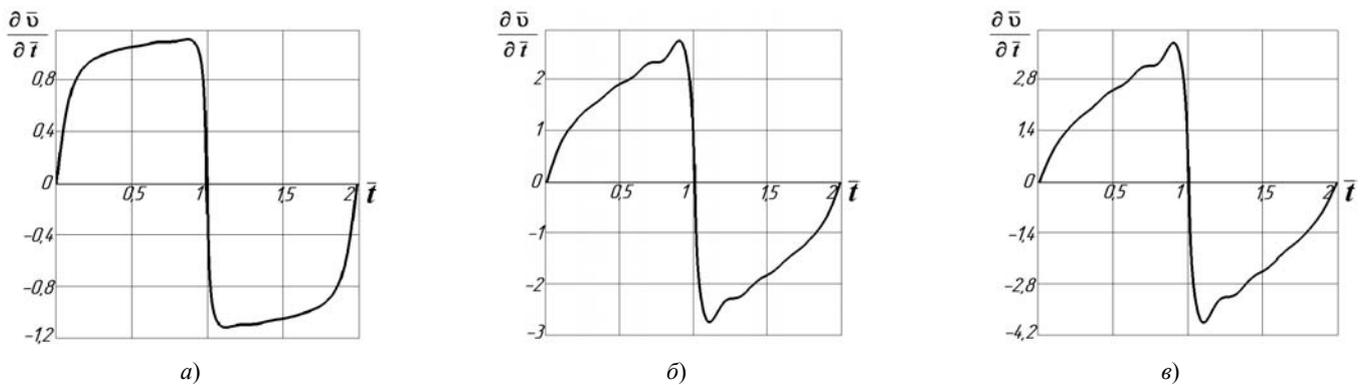


Рис. 2.5. Зависимость ускорения течения малосжимаемой жидкости в модуляторе роторного аппарата при $\delta_a = 0,05$; $l/a_p = 5$; $z_p = z_c = 20$ и значениях:
 $a - K_k = 0,3$; $b - K_k \approx 1,1$; $c - K_k \approx 1,3$

Следует отметить, что, так как уравнение (1.73) было получено из дифференциальных уравнений Навье-Стокса и неразрывности для несжимаемой жидкости, то при выводе его в безразмерном виде использовался масштаб времени $T = a_c / \omega R_2$. Очевидно, что на характер зависимости это не влияет, а переход к размерным величинам при необходимости сравнения результатов, полученных по формулам для несжимаемой и сжимаемой среды не представляет сложности.

Графики ускорения строились с использованием программы MAPLE 8.0. На рис. 2.6 представлен график зависимости ускорения течения жидкости от времени за период процесса открывания – закрывания канала статора.

Сравнение рис. 2.6 и рис. 2.4, а показывает удовлетворительное совпадение характера графиков, в период времени процесса открывания – закрывания канала статора. Поведение жидкости в момент, когда канал статора перекрыт промежутком между каналами ротора, рассмотрено в работе [13]. Таким образом, при работе роторного аппарата на промышленных частотах вращения привода при определенных значениях газосодержания возникает гидравлический удар и модели, не учитывающие сжимаемость жидкости, дают неадекватное описание реальной гидромеханической обстановки в аппарате.

На основании проведенных исследований можно сделать следующий вывод – при расчетах роторного аппарата с возможностью возникновения гидравлического удара в каналах модулятора следует учитывать сжимаемость среды. Полученные с этой целью и приведенные в [1] аналитические зависимости более точно отражают физику процессов течения и, таким образом, повышают точность расчетов.

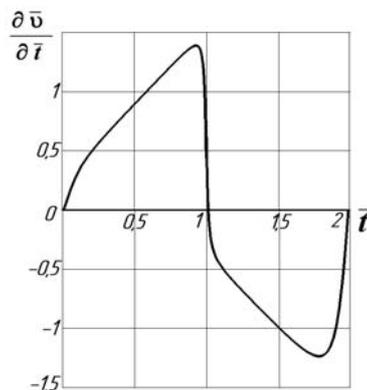


Рис. 2.6. Зависимость ускорения течения несжимаемой жидкости в модуляторе роторного аппарата при $\delta_a = 0,05$; $l/a_p = 5$; $z_p = z_c = 20$ и $K_k = 0,3$

2.2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МЕСТНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Графики, показывающие влияние радиального зазора между ротором и статором, скорости вращения ротора и давления в полости ротора от $\sqrt{\Delta P}$, представлены на рис. 2.7. Исследования проводились на установке производительностью до 17 м³/ч (рис. 2.1).

Полученные результаты показывают, что изменение величины зазора оказывает более значительное влияние на величину объемного расхода чем изменение угловой скорости вращения ротора. Анализируя графики, можно утверждать, что с увеличением радиального зазора для возникновения кавитации, признаком начала которой служит изменение угла наклона прямых, необходимы большие расходы жидкости. Следовательно, уменьшение зазора расширяет пределы кавитационной работы роторного аппарата и исследование гидравлических характеристик при минимально достижимом радиальном зазоре представляет наибольший интерес.

Поэтому в дальнейшем исследования гидравлических характеристик на установке, показанной на рис. 2.2, проводились при минимальном зазоре $\delta = 0,1 \pm 0,02$ мм.

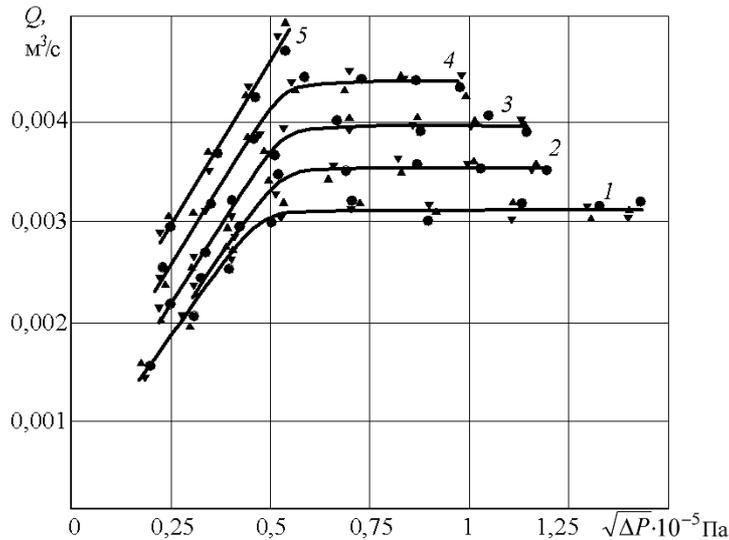


Рис. 2.7. Зависимость объемного расхода жидкости от перепада давлений между ротором и камерой озвучивания от угловой скорости вращения ротора: $l/a_p = 2$; 1 – $\delta = 0,05$ мм; 2 – $\delta = 0,1$ мм; 3 – $\delta = 0,15$ мм; 4 – $\delta = 0,2$ мм;

5 – $\delta = 0,25$ мм; ∇ – $\omega = 250$ с⁻¹; \blacktriangle – $\omega = 150$ с⁻¹; \bullet – $\omega = 50$ с⁻¹

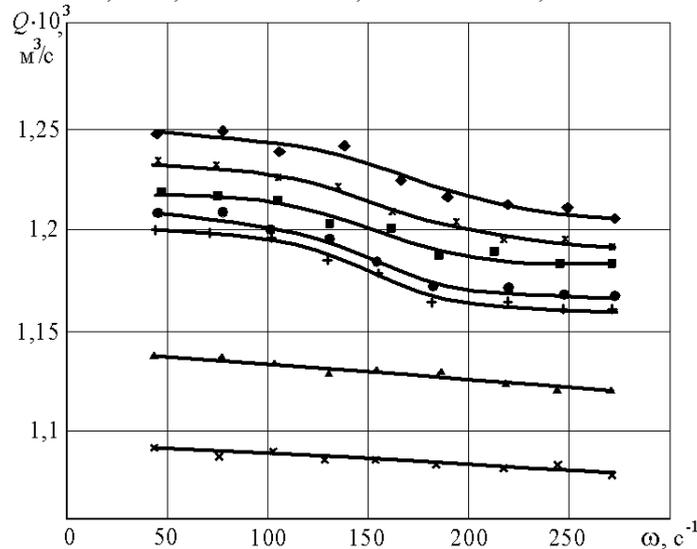


Рис. 2.8. Зависимость объемного расхода жидкости от перепада давлений между ротором и камерой озвучивания от угловой скорости вращения ротора:

$\delta = 0,1$ мм; $l/a_p = 5$; $\Delta P \cdot 10^{-5}$ Па: \blacklozenge – 2,75; * – 2,61;

\bullet – 2,43; + – 2,28; \blacksquare – 2,2; \blacktriangle – 1,62; \times – 0,93

На рис. 2.8 показаны зависимости объемного расхода от ΔP и ω_p . Следует отметить, что в новой установке, спроектированной на кафедре ТММ и ДМ Тамбовского государственного технического университета (рис. 2.2), кавитация возникает практически при всех значениях перепада давлений, в рассмотренном диапазоне изменения угловой скорости. Таким образом, учитывая погрешности измерения расхода $\pm 10\%$, графики на рис. 2.8 идентичны графикам на рис. 2.4 в их правой части. Изменение перепада давлений осуществлялось изменением проходного сечения трубопровода на выходе из роторного аппарата.

Особенный интерес представляет гидравлическое сопротивление роторного аппарата в режиме наиболее интенсивной кавитации, характеризующейся значением K_c . Характерная зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от критерия кавитации Стайлса изображена на рис. 2.9.

Как видно из графика, в квадратичной области течения жидкости коэффициент гидравлического сопротивления практически постоянен до критического коэффициента кавитации, а при $K_c > K_{c_{кр}}$ коэффициент ξ значительно возрастает.

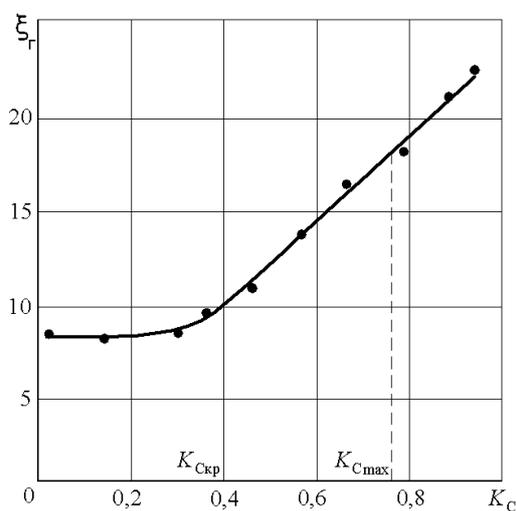


Рис. 2.9. Характерная зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления от коэффициента кавитации при $\delta = 0,1$ мм; $\omega = 44$ с⁻¹

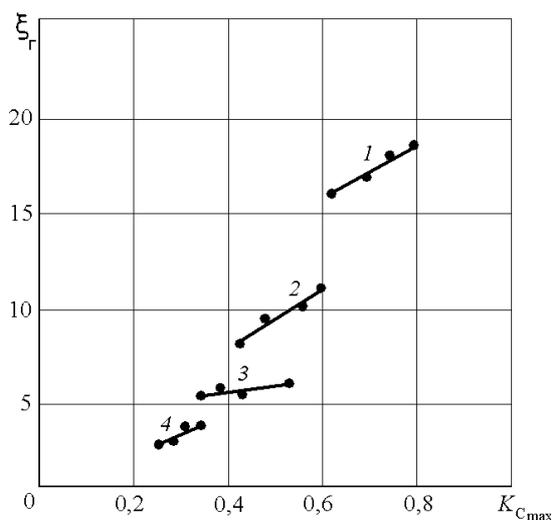


Рис. 2.10. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления от коэффициента кавитации при различных относительных радиальных зазорах:

1 – $\delta_a = 0,01$; 2 – $\delta_a = 0,02$; 3 – $\delta_a = 0,03$; 4 – $\delta_a = 0,04$

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления при работе роторного аппарата в режиме интенсивной кавитации построен график зависимости ξ_Γ от $K_{c_{\max}}$ (рис. 2.10).

Из графика следует, что в пределах одной величины радиального зазора при увеличении $K_{c_{\max}}$ значение коэффициента гидравлического сопротивления возрастает незначительно.

Экспериментальные данные описываются эмпирической зависимостью

$$\xi_\Gamma = 12,8 K_{c_{\max}} (3,9 - 96\delta_a)^{1,82}. \quad (2.16)$$

Эта формула позволяет определить коэффициент местного гидравлического сопротивления в режиме интенсивной кавитации в следующих пределах изменения параметров $0,25 \leq K_{c_{\max}} \leq 0,8$; $0,01 \leq \delta_a \leq 0,04$. Отклонения рассчитанных по (2.16) значений ξ от экспериментальных не превышают 7 %.

2.2.3. ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА КАНАЛА В СТАТОРЕ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ АППАРАТА

Угол наклона каналов в статоре относительно направления вращения ротора α^* изменялся направлением вращения электродвигателя на установке рис. 2.1. Полученные зависимости изображены на рис. 2.11.

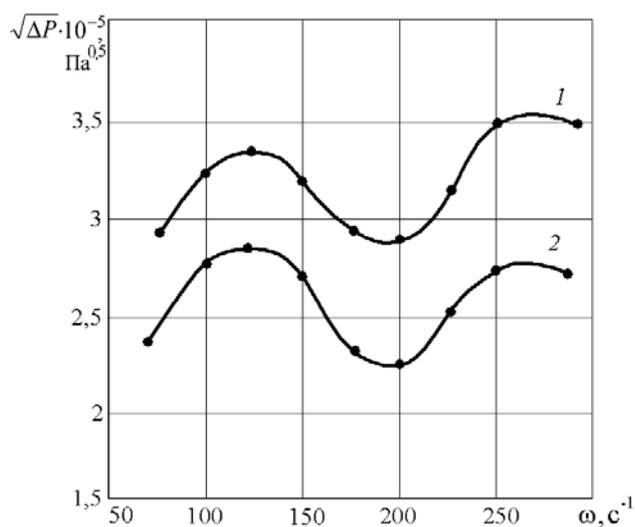


Рис. 2.11. Зависимость гидравлического сопротивления роторного аппарата от скорости вращения ротора при различных углах наклона каналов статора:

$$1 - \alpha^* = 150^\circ; 2 - \alpha^* = 60^\circ; l/a_p = 2$$

Из полученных зависимостей следует, что при изменении угла наклона в статоре на 90° перепад давлений уменьшился на 10...15 %.

Полученный характер кривых объясняется резонансными явлениями в модуляторе роторного аппарата и будет подробно проанализирован в п. 2.2.4.

2.2.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА В РОТОРНЫХ АППАРАТАХ

В 1.2 рассмотрено влияние неустановившегося процесса распространения импульсов давления в канале статора. Для подтверждения полученных результатов проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рис. 2.12.

Из анализа зависимостей на рис. 2.12 следует, что с увеличением давления в камере озвучивания наблюдаются ярко выраженные максимумы ΔP в зависимости от угловой частоты вращения ротора, причем при $P_k \geq 4 \cdot 10^5$ Па перепад давления между полостью ротора и камеры практически не зависит от ω .

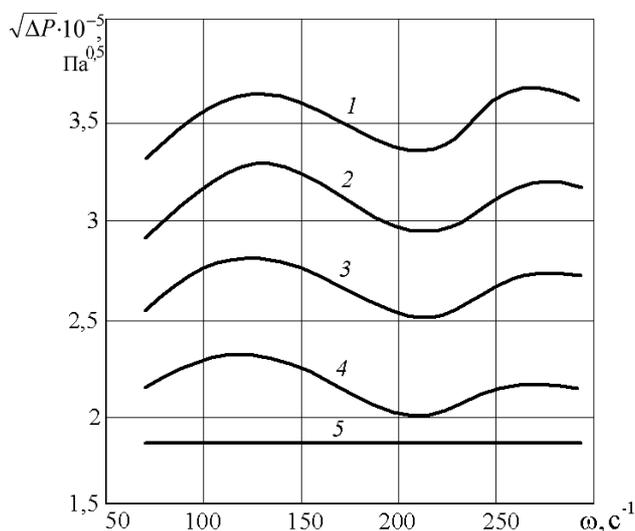


Рис. 2.12. Зависимость разности давлений между ротором и камерой озвучивания от угловой скорости вращения ротора при различных давлениях в камере:

$$1 - P_k = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; 2 - P_k = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; 3 - P_k = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; 4 - P_k = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; \\ 5 - P_k = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; Q = 0,00315 \text{ м}^3/\text{с}; \delta_a = 0,01; l/a_p = 2$$

Согласно выражению (1.9), для конкретной конструкции роторного аппарата (рис. 2.1) и его геометрических размеров получены следующие результаты. Максимумы перепада давлений наблюдаются при $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$ и $\omega = 250 \text{ с}^{-1}$. При проверке, согласно формулы (1.9), получено, что в первом случае $\dot{\tau}/\ddot{\tau} = 10$, во втором $\dot{\tau}/\ddot{\tau} = 6$. Полученный результат, а также графики на рис. 2.11 хорошо согласуются с предложенным механизмом воздействия неустановившегося процесса распространения импульсов давления на гидравлические характеристики роторного аппарата. Отсутствие максимумов ΔP при $P_k \geq 4 \cdot 10^5$ Па, очевидно, объясняется тем, что изменение перепада давлений за счет резонансного процесса становится незначительным по сравнению с давлением в камере озвучивания.

Как следует из пункта 1.1 резонансные явления в каналах статора рассматриваются также в установившемся режиме, т.е. канал рассматривается Z как отрезок волновой системы с множеством резонансных частот, определяемых выражениями (1.1), (1.2), (1.4) и (1.5).

Возможность возбуждения резонанса определялась с помощью предложенной в 2.1.2 методики, позволяющей провести анализ спектральной плотности акустических колебаний в роторном аппарате. Результаты спектрального анализа представлены на рис. 2.13 – 2.17.

Для анализа рассмотрим резонансные частоты канала статора и камеры озвучивания.

Для камеры озвучивания линейный резонанс может наблюдаться в камере озвучивания на следующих частотах ($l_k = 0,06$ м):

$$f_k = ck/4l_k, \quad k = 1, 3, 5, \dots;$$

$$f_k = 583, 1743, 2900, \dots \text{ Гц.}$$

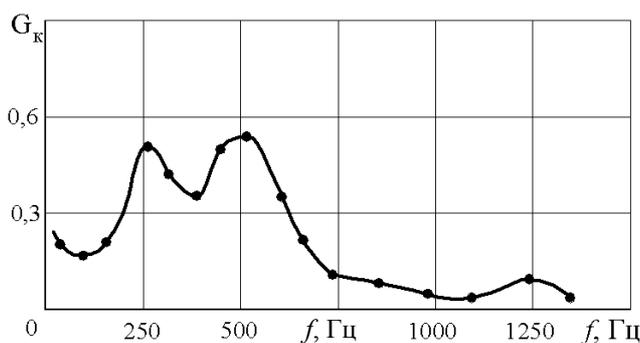


Рис. 2.13. График спектральной плотности при $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$; $\delta_a = 0,04$; $P_k = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $z_p = 10$; $z_c = 50$

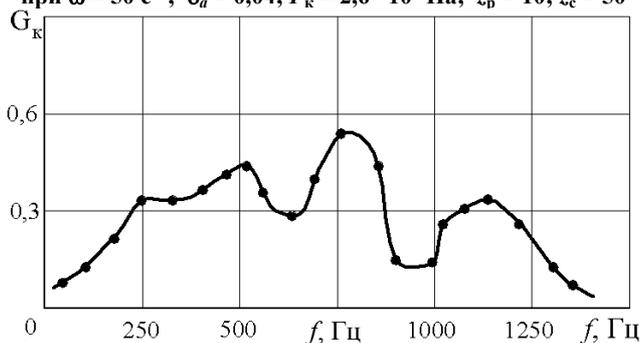


Рис. 2.14. График спектральной плотности при $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$; $\delta_a = 0,04$; $P_k = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $z_p = 10$; $z_c = 50$

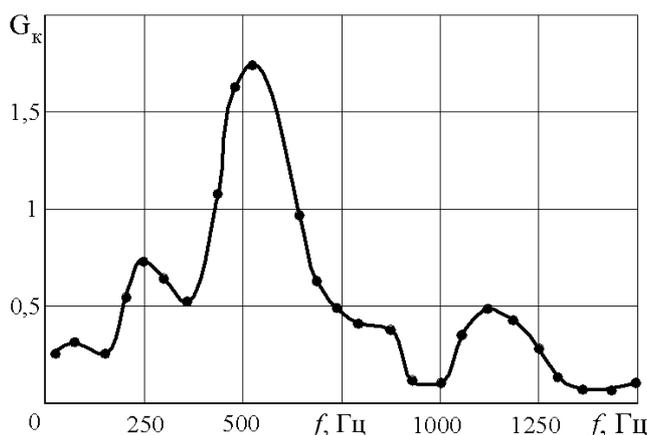


Рис. 2.15. График спектральной плотности при $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$; $\delta_a = 0,04$; $P_k = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $z_p = 10$; $z_c = 50$

Для нелинейного резонанса в камере озвучивания резонансные частоты определяются следующим образом:

$$f_k = ck/8l_k, \quad k = 1, 3, 5, \dots;$$

$$f_k = 291, 873, 1455, 2037, \dots \text{ Гц.}$$

Частоты для нелинейного резонанса в канале статора:

а) когда он перекрыт промежутком между каналами ротора ($l_c = 0,057$ м):

$$f_c = c\kappa/4l_c, \quad \kappa = 1, 3, 5, \dots;$$

$$f_c = 614, 1842, 3070, \dots \text{ Гц};$$

б) канал статора открыт:

$$f_c = c\kappa/2l_c, \quad \kappa = 1, 2, 3, \dots;$$

$$f_c = 1228, 2456, 3684, \dots \text{ Гц}.$$

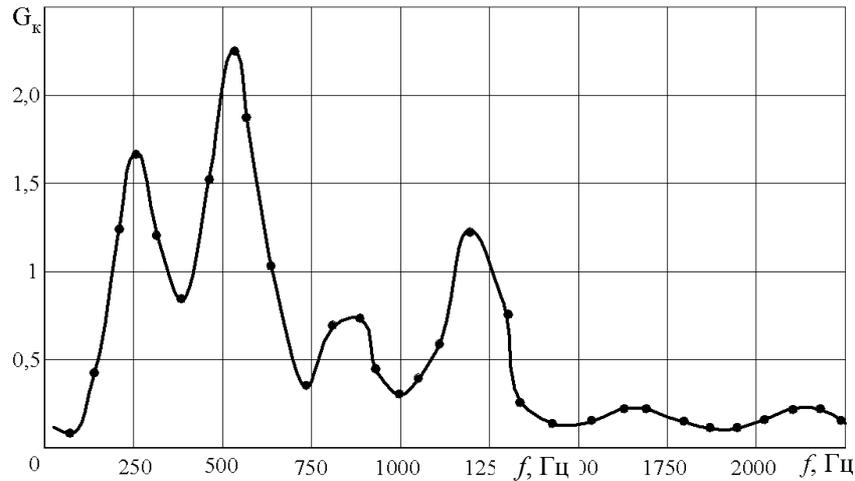


Рис. 2.16. График спектральной плотности
при $\omega = 200 \text{ с}^{-1}$; $\delta_a = 0,04$; $P_\kappa = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $z_p = 10$; $z_c = 50$

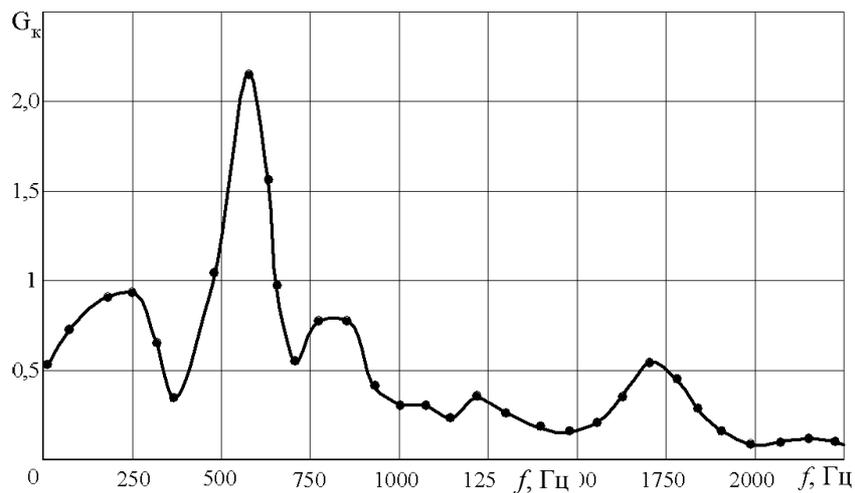


Рис. 2.17. График спектральной плотности
при $\omega = 200 \text{ с}^{-1}$; $\delta_a = 0,04$; $P_\kappa = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $z_p = 10$; $z_c = 50$

Частоты для нелинейного резонанса в канале статора:

а) канал закрыт промежутком между каналами ротора:

$$f_c = c\kappa/8l_c, \quad \kappa = 1, 3, 5, \dots;$$

$$f_c = 307, 921, 1521, 2149, \dots \text{ Гц};$$

б) канал статора открыт:

$$f_c = c\kappa/4l_c, \quad \kappa = 1, 2, 3, \dots;$$

$$f_c = 614, 1228, 1842, \dots \text{ Гц}.$$

Анализируя графики спектральной плотности, можно сделать вывод, что из всех предложенных зависимостей для определения частоты резонансных колебаний в каналах статора и камере озвучивания практически все отвечают графикам спектральной плотности, но в разной степени, в зависимости от угловой скорости вращения ротора, с погрешностью 3...15%. Таким образом, нам необходимо оценить возможность использования этих зависимостей для методики расчета аппарата.

Из теоретического анализа, проведенного в 1 и 2 главах работы [1] следует, что наиболее эффективно роторный аппарат работает при $K_\kappa \geq 10$, т.е. необходимо увеличивать угловую частоту вращения ротора при постоянном объемном расходе.

Таким образом, для нас представляют интерес графики при $\omega > 150 \text{ с}^{-1}$, т.е. рис. 2.15 – 2.17, из которых следует, что наибольшая энергия звуковой волны приходится на $f \approx 540 \dots 580 \text{ Гц}$, определяемой по формуле (1.2).

Расхождение рассчитанных значений и полученных экспериментально объясняется тем, что основное условие резонанса (1.6), т.е. $l_c = l_k$ в нашем случае выполняется не полностью с погрешностью $\sim 7\%$. Однако, следует считать, что теоретические предположения о возникновении резонансного процесса в роторном аппарате нашли удовлетворительное экспериментальное подтверждение. Для определения условий возникновения резонансного режима работы необходимо использовать выражение (1.2).

Для подтверждения возможности образования стоячих волн в камере озвучивания было проведено исследование распределения амплитуды акустических колебаний по радиусу камеры озвучивания. Результаты проведенных экспериментов, обработанных с помощью методики, предложенной в пункте 2.1.2, показаны на рис. 2.18. На резонансной частоте, определенной по выражению (1.2), определено распределение G_k по радиусу камеры, т.е. по длине l_k . Для этого гидрофон перемещается по радиусу и в четырех точках проводилась регистрация полученного сигнала.

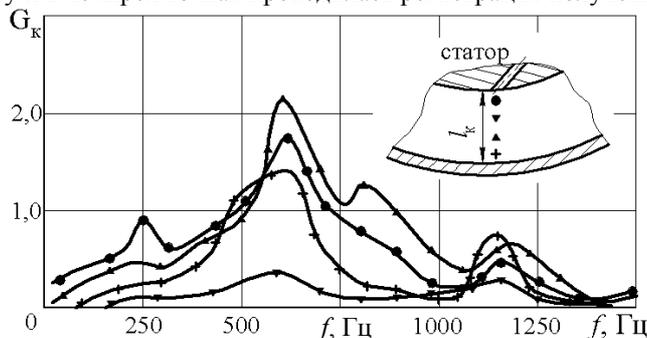


Рис. 2.18. График спектральной плотности при $\omega = 200 \text{ с}^{-1}$; $\delta_a = 0,04$; $P_k = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $z_p = 10$; $z_c = 50$

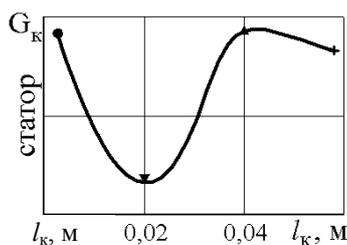


Рис. 2.19. Распределение G_k по длине камеры озвучивания

Из графика на рис. 2.19 следует, что звуковая волна удовлетворительно соответствует стоячей волне. Таким образом, подтверждена возможность образования стоячих волн в камере озвучивания роторного аппарата.

2.2.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАССОВЫХ СИЛ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕЧЕНИЯ СРЕДЫ В МОДУЛЯТОРЕ РОТОРНОГО АППАРАТА И ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ТЕЧЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ И СЖИМАЕМОЙ СРЕДЫ

Механизм влияния соотношения центробежных и кориолисовых сил на течение жидкости в каналах ротора и статора роторного аппарата рассмотрен в п. 1.1.8. работы [1]. Теоретическая кривая зависимости амплитуды модуля отрицательного ускорения от критерия K_k показана на рис. 1.27 [1]. Для подтверждения предложенной модели течения под действием массовых сил проведены исследования по методике изложенной в п. 2.1.2.

Некоторые характерные результаты показаны на рис. 2.20. Из полученных осциллограмм нас интересует только отрицательная часть динамического давления, поэтому построены графики, изображенные на рис. 2.21.

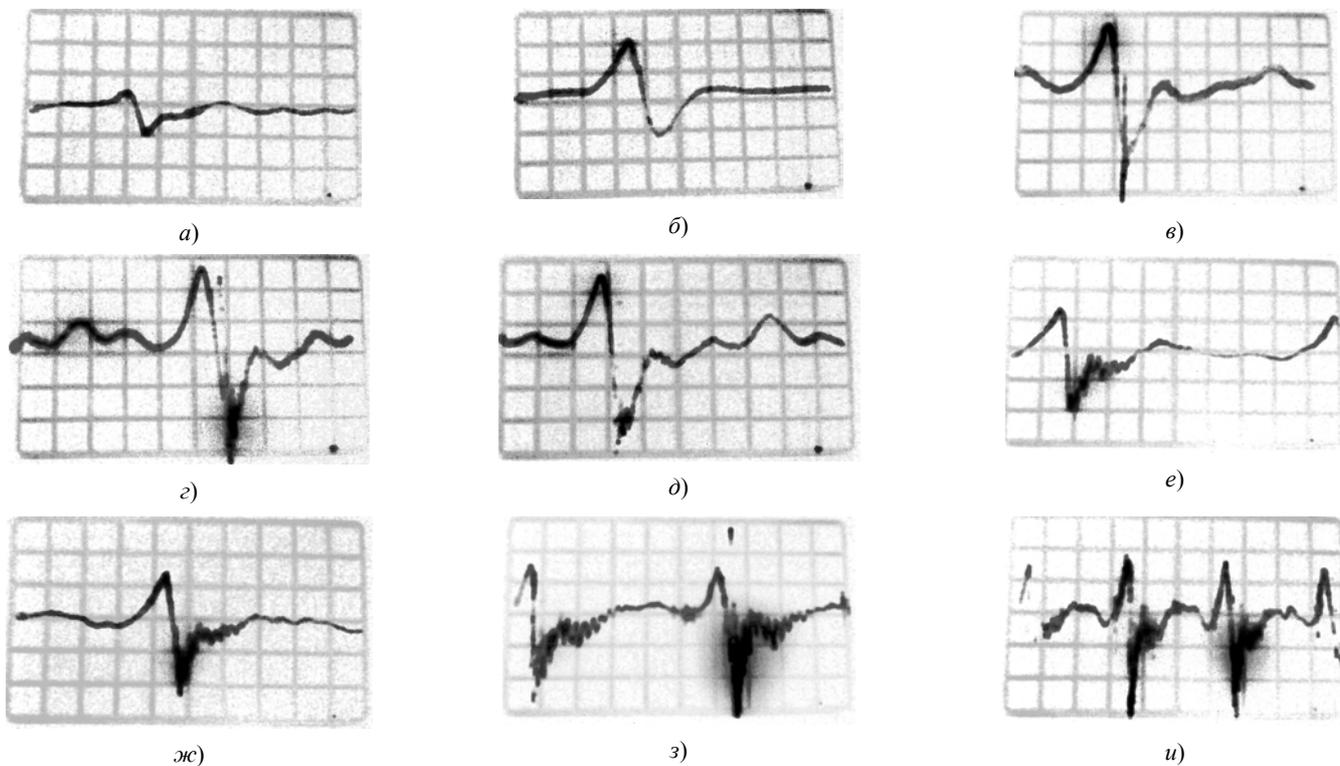


Рис. 2.20. Зависимость амплитуды динамического давления от времени при:
a - $K_k = 0,1$; *б* - $K_k = 0,2$; *в* - $K_k = 0,33$; *г* - $K_k = 0,4$; *д* - $K_k = 0,5$; *е* - $K_k = 0,6$;
ж - $K_k = 0,77$; *з* - $K_k = 0,99$; *и* - $K_k = 1,1$; $\Delta P = 2,75 \cdot 10^5$ Па

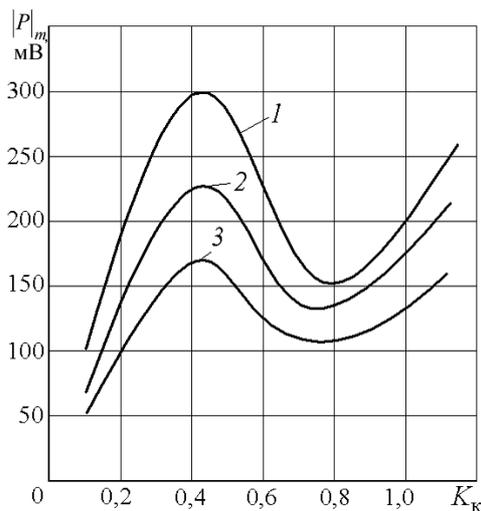


Рис. 2.21. Зависимость отрицательного импульса давления от критерия K_k :
1 - $\Delta P = 2,75 \cdot 10^5$ Па; *2* - $\Delta P = 2,62 \cdot 10^5$ Па; *3* - $\Delta P = 2,4 \cdot 10^5$ Па;
 $\delta_a = 0,05$, $\chi = 0,1$, $l / a_p = 5$

Сравнивая рисунки 1.27 из [1] и 2.21, можно сделать вывод, что наблюдается качественное соответствие теоретических и экспериментальных графиков. Это свидетельствует об адекватности предложенной модели течения среды в поле центробежных и кориолисовых сил.

Анализируя рис. 2.21, можно сделать предварительные выводы и рекомендации, позволяющие повысить эффективность работы роторных аппаратов. В исследованных пределах ($0,1 \leq K_k \leq 1,1$) наихудший режим работы наблюдается при $0,7 \leq K_k \leq 0,9$, а начиная с $K_k > 0,9$ амплитуда отрицательного давления начинает возрастать. Из исследованного интервала наилучшие результаты получаются при $0,3 \leq K_k \leq 0,5$, т.е. когда преобладает влияние кориолисовой силы, что подтверждает теоретические выкладки в п. 1.1.8 из [1]. Наихудший режим соответствует примерному равенству величин центробежных и кориолисовых сил. Возрастание величин центробежных сил, начиная с $K_k \approx 0,9$, приводит к увеличению амплитуды отрицательного давления.

Полученные результаты, характеризующие влияние K_k на амплитуду отрицательного ускорения, должны быть подтверждены исследованием кавитационных явлений, которые, в конечном счете, определяют эффективность работы роторного аппарата, что будет сделано в п. 2.2.5.

Проведена проверка адекватности предложенных моделей течения несжимаемой и сжимаемой жидкости предложенной в п.п. 1.1 и 1.2 работы [1]. Конкретно проведены расчеты характера зависимости $(\partial v / \partial t)_{\max}$ для несжимаемой жидкости, используя зависимости (1.37)–(1.75), с учетом (1.22) и сжимаемой жидкости по выражениям (1.130) и (1.22). Граница применимости моделей определялась по выражению (1.131) с учетом (1.132).

Приведем пример расчета. Рассмотрим вначале границу применимости моделей.

В нашем случае $a_c = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $l_p = 10^{-2}$ м, $c = 140$ м/с, $\Delta P = 2,75 \cdot 10^5$ Па (кривая 1, рис. 2.21), $R_2 = 0,1$ м, $l / a_p = 5$, $\delta = 10^{-4}$ м, $h_c = 10^{-3}$ м.

За масштаб скорости примем $V = \sqrt{2\Delta P / \rho}$, а время закрытия канала статора по (2.13) $t_3 = a_c / \omega R_2$. Тогда масштаб скорости равен $V = 17,8$ м/с с учетом (2.14)

$$\omega R_2 = \frac{ca_c}{2l_p} = 14 \text{ м/с.}$$

Граница применимости модели течения несжимаемой и сжимаемой жидкости определяется через критерий

$$K_k = \frac{\omega R_2}{V} = 0,79.$$

Используя модель течения несжимаемой жидкости в интервале изменения $0,4 \leq K_k \leq 0,79$, построен график изменения безразмерного ускорения $|\partial v / \partial t|_{\max}$. Полученные результаты изображены на рис. 2.22.

Для модели течения сжимаемой жидкости $K_k > 0,79$ построен график изменения $|\partial v / \partial t|_{\max}$, который также показан на рис. 2.22.

Анализ рис. 2.22 показывает, что на определенной границе применимости модели течения несжимаемой и сжимаемой среды при одинаковых значениях параметров наблюдается несовпадение значений $|\partial v / \partial t|_{\max}$ не более 3...7%. Это следует признать удовлетворительным и можно объяснить принятыми допущениями при выводе зависимостей $v(t)$ для несжимаемой и сжимаемой жидкостей. Следовательно, с достаточным основанием можно считать, что предложенные модели и выражения для определения разграничения их применимости удовлетворительно подтверждены экспериментально.

Однако следует отметить, что модель течения несжимаемой жидкости (рис. 2.22) адекватно экспериментальным данным примерно при $0,4 \leq K_k \leq 0,8$, т.е. не описывает левую возрастающую ветвь графиков рис. 2.21. Однако отметим, что значения $K_k < 0,4$ соответствуют малым частотам вращения ротора. В нашем случае при $Q = 4,5$ м³/ч угловая частота вращения при этом значении K_k меньше $\omega < 70$ с⁻¹, а как показано в [1], при уменьшении ω падает энергия звуковых колебаний. Таким образом, значения $K_k < 0,4$ не представляют интереса для практического использования в реальных условиях эксплуатации роторного аппарата.

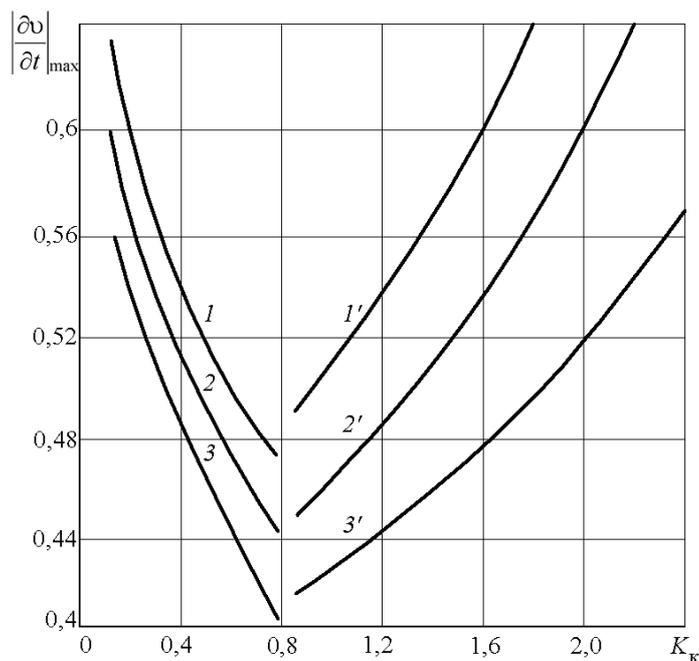


Рис. 2.22. Зависимости безразмерного ускорения от критерия K_k для несжимаемой жидкости 1, 2, 3, для сжимаемой 1', 2', 3':

$\delta = 10^{-4}$ м; $l / a_p = 5$; $\chi = 0,1$; 1, 1' – $\Delta P = 2,75 \cdot 10^5$ Па; 2, 2' – $\Delta P = 2,62 \cdot 10^5$ Па; 3, 3' – $\Delta P = 2,4 \cdot 10^5$ Па

2.3. ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ

2.3.1. ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ КАВИТАЦИИ

В пункте 2.1.2 работы [1] рассмотрена модель динамики радиально-сферических колебаний пузыря применительно к особенностям работы роторного аппарата. Для подтверждения ее адекватности по методике, описанной в 2.1.3, проведено экспериментальное исследование закономерностей акустической кавитации.

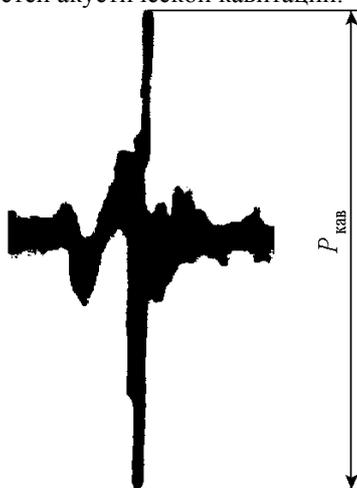


Рис. 2.23. Оциллограмма характерного импульса кавитационного давления

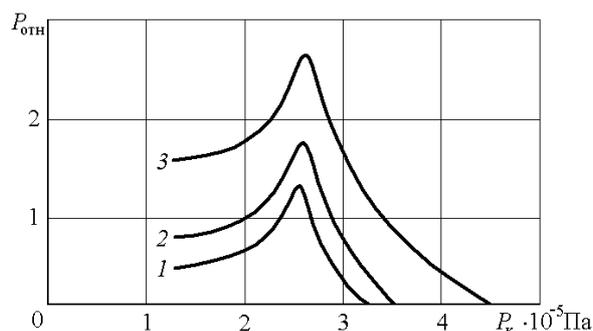


Рис. 2.24. Зависимость относительной величины кавитационных импульсов от давления в камере озвучивания при различных скоростях вращения ротора:

$$\delta_a = 0,01, l/a_p = 2; 1 - K_k = 0,22; 2 - K_k = 2,7; 3 - K_k = 1,4$$

Оциллограмма характерного импульса кавитационного давления и его величины $P_{\text{кав}}$ показана на рис. 2.23. После обработки данных, полученных на установке производительностью $17,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ с наклонными каналами, результаты представлены на рис. 2.24 [2]. Графики представлены в относительных величинах, т.е. за единицу принято максимальное значение при радиальном зазоре $\delta = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, при котором кавитация имеет наименьшую интенсивность. Так как наибольший интерес представляет режим наиболее развитой кавитации, то представлены результаты экспериментов только при $\delta = 10^{-4} \text{ м}$. При всех режимах работы кривая зависимости относительной величины кавитационных импульсов от давления в камере озвучивания P_k имеет одинаковый характер. Наблюдается наличие максимума, который находится в достаточно узком интервале давлений $P_k = (2,5 \dots 2,8) \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Отметим, что с увеличением зазора интенсивность кавитации падает [2].

Аналогичные результаты получены при испытании установки производительностью $4,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ с радиальными каналами. При этом максимум кавитации наблюдается при давлении в камере озвучивания $P_k = (0,15 \dots 0,25) \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Сравнивая рис. 2.24 и 2.25 с рис. 2.3 из работы [1], описывающем расчетную зависимость $P_{\text{кав}}$ от χ_a , можно сделать вывод об их качественном соответствии. При этом следует учитывать, что χ_a пропорциональна P_k по выражению (2.9).

Таким образом, по крайней мере качественно, подтверждена адекватность модели динамики радиально-сферических колебаний кавитационного пузыря.

Для определения критического коэффициента кавитации Стайлса, характеризующего исчезновение кавитационных импульсов давления для различных режимов в результате их обработки получены графики, изображенные на рис. 2.26. Из графиков следует, что при увеличении критерия Струхала и радиального зазора величина критерия $K_{\text{скр}}$ снижается, т.е. уменьшается диапазон кавитационной работы роторного аппарата.

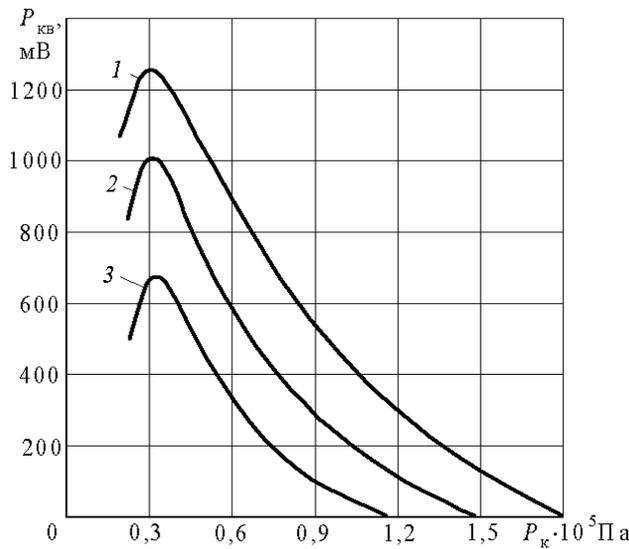


Рис. 2.25. Зависимость кавитационного импульса от статического давления:
 $\delta_a = 0,05$, $l/a_p = 5$; 1 - $K_k = 0,38$; 2 - $K_k = 1,3$; 3 - $K_k = 0,3$

В результате обработки экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость

$$K_{кр} = (0,0006\delta_a^{-1,1}Sh + 2,6)^{-1}. \quad (2.17)$$

Отклонения расчетных данных от экспериментальных зависимостей не превышает 8 %, при изменении параметров в пределах $5 \leq Sh \leq 95$; $0,01 \leq \delta_a \leq 0,05$.

Для определения режима наиболее интенсивной кавитации определены зависимости коэффициента кавитации, определенные по экспериментальным данным, часть из которых представлены на рис. 2.24 и 2.25. Эти зависимости показаны на рис. 2.27. Экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью

$$K_{сmax} = 1,26 \cdot 10^{-11\delta_a} Sh^{-0,13}. \quad (2.18)$$

Отклонения расчетных данных от экспериментальных зависимостей не превышает 8 %, при изменении параметров в пределах $5 \leq Sh \leq 95$; $0,01 \leq \delta_a \leq 0,05$.

Как следует из графиков на рис. 2.24 и 2.25 условием эффективной работы роторного аппарата является неравенство

$$K_{сmax} > K_{кр}.$$

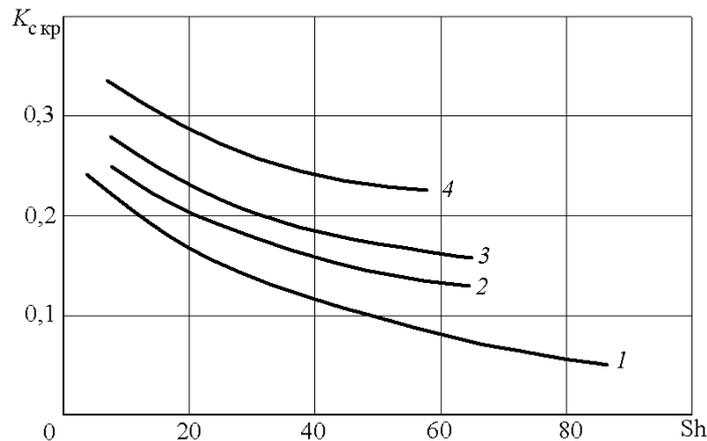


Рис. 2.26. Зависимость критического коэффициента кавитации от критерия Струхалия при различных относительных радиальных зазорах:

1 - $\delta_a = 0,01$; 2 - $\delta_a = 0,02$; 3 - $\delta_a = 0,03$; 4 - $\delta_a = 0,04$

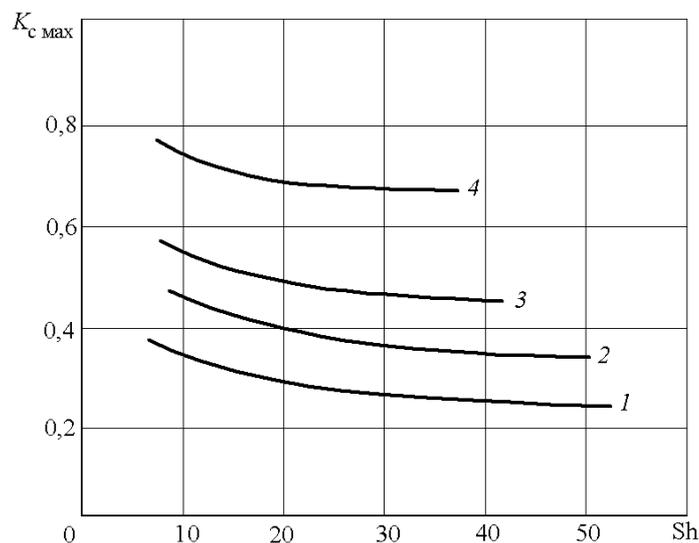


Рис. 2.27. Зависимость оптимального коэффициента кавитации от критерия Струхалия при различных относительных радиальных зазорах:
 1 – $\delta_a = 0,04$; 2 – $\delta_a = 0,03$; 3 – $\delta_a = 0,02$; 4 – $\delta_a = 0,01$

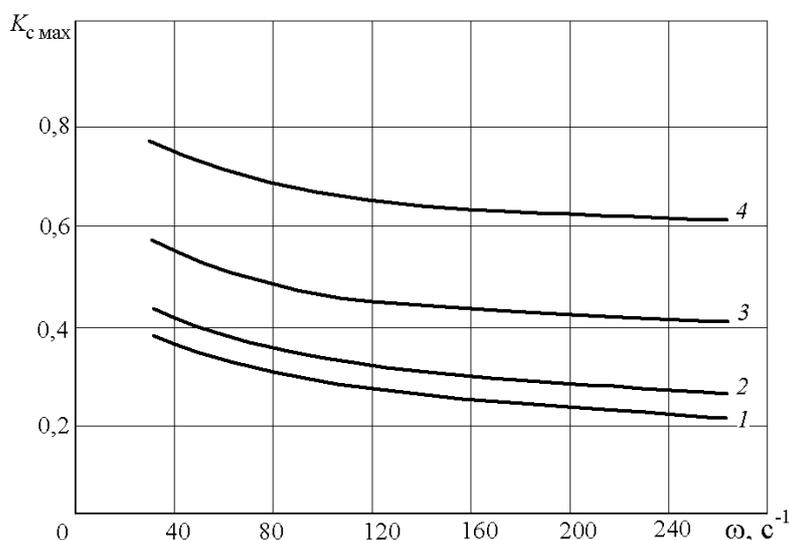


Рис. 2.28. Зависимость оптимального коэффициента кавитации от угловой скорости вращения ротора при различных относительных радиальных зазорах:
 1 – $\delta_a = 0,04$; 2 – $\delta_a = 0,03$; 3 – $\delta_a = 0,02$; 4 – $\delta_a = 0,01$

Из анализа графиков на рис. 2.24 и 2.26 следует, что увеличение зазора уменьшает пределы кавитационного режима работы, т.е. для возникновения кавитации необходимо увеличивать объемный расход жидкости через аппарат.

Для удобства использования формулы (2.18) в методике расчета роторного аппарата она преобразована к виду

$$K_{c \max} = \omega^{-0,17} (1,24 - 9,25\delta_a)^3. \quad (2.19)$$

Графики, соответствующие (2.19) показаны на рис. 2.28.

Выражение (2.19) в пределах исследования параметров дает отклонение расчетных значений от экспериментальных не более 9 %.

2.3.2. ВЛИЯНИЕ УГЛОВОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ КАВИТАЦИИ

По методике, изложенной в п. 2.1.3, проведено исследование влияния угловой скорости вращения на интенсивность кавитации на установке, изображенной на рис. 2.2. Полученные результаты показаны на рис. 2.29.

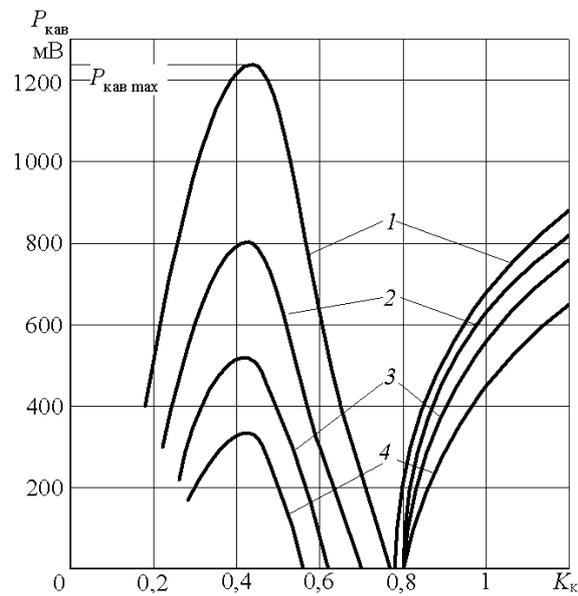


Рис. 2.29. Зависимость интенсивности кавитации от критерия $K_к$:
 $\delta_a = 0,05$; $l/a_0 = 5$; 1 – $\Delta P = 2,75 \cdot 10^5$ Па; 2 – $\Delta P = 2,62 \cdot 10^5$ Па;
 3 – $\Delta P = 2,4 \cdot 10^5$ Па; 4 – $\Delta P = 2,25 \cdot 10^5$ Па

На графиках видны характерные максимумы величин кавитационных импульсов кавитационного давления, которые приходятся на значения $K_к \approx 0,43 \dots 0,44$. Затем при увеличении критерия $K_к$ интенсивность кавитации уменьшается до полного исчезновения при $0,55 \leq K_к \leq 0,8$. При дальнейшем увеличении ω и соответственно $K_к$ величина кавитационных импульсов давления начинает возрастать, причем на определенном интервале изменений $K_к$ кавитация отсутствует. Один из выводов, следующий из анализа графиков на рис. 2.29, – для увеличения интенсивности кавитации и расширения диапазона кавитационной работы роторного аппарата необходимо увеличивать ΔP , т.е. объемный расход среды. Такой же вывод сделан в п. 2.3.1.

Сравнивая графики на рис. 2.21, характеризующие влияние кориолисовых и центробежных сил на течение жидкости в модуляторе, и рис. 2.29, можно отметить их удовлетворительное совпадение. Например, максимальное значение $|\partial v/\partial t|$ на рис. 2.21 достигается при $K_к \approx 0,4$, а на рис. 2.29 максимум кавитации наблюдается при $K_к \approx 0,43 \dots 0,44$, т.е. они различаются не более чем на 10%. Этот результат следует считать удовлетворительным для гидроакустических и гидродинамических исследований.

Таким образом, можно утверждать, что экспериментально подтверждена модель, описывающая влияние центробежных и кориолисовых сил на гидродинамику течения в модуляторе роторного аппарата.

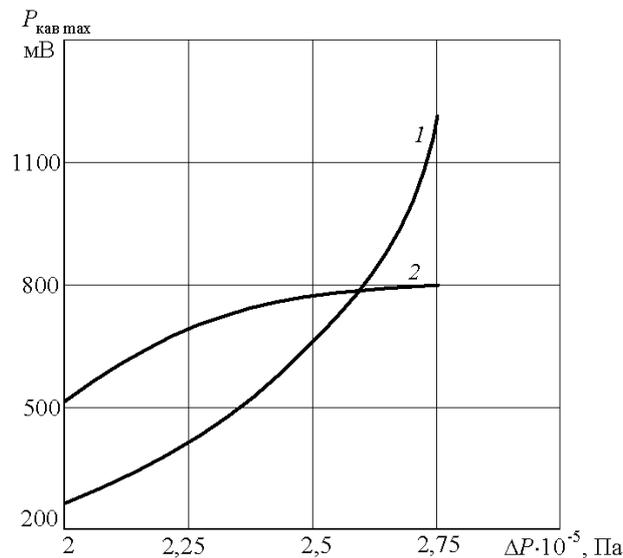


Рис. 2.30. Зависимость $P_{кав}$ от ΔP :
 1 – $K_к = 0,44$; 2 – $K_к = 1,1$

Отсутствие кавитации в интервале $0,55 \leq K_к \leq 0,8$ в зависимости от величины ΔP объясняется тем, что величина $|\partial v/\partial t|_{max} \sim |P_m|$ недостаточна для возникновения кавитационного процесса.

Отметим, что результаты, полученные на установке аналогичной нашей [13, рис. 5.2], отличающейся количеством каналов – в нашей $z = 5$, в работе [13] – $z = 20$, имеют другой характер, чем в данном исследовании. Это объясняется тем, что в работе [13] диапазон изменения $K_к$ начинается $\sim 0,6$ ($\Delta P = 0,8 \cdot 10^5$ Па, $\omega R_2 = 5$ м/с). Таким образом, в настоящей работе увеличивая ΔP , т.е. в конечном случае V , мы расширяем диапазон изменения $K_к$ по меньшему значению почти в 3 раза.

Следовательно, участок с $K_k > 0,6$ (рис. 2.29) соответствует режимам, исследованным в [13], и полученные результаты практически совпадают, особенно качественно.

Для определения значений критерия K_k , при которых воздействие кавитации на технологический процесс наиболее эффективно, построены графики изменения $P_{\text{кав}}$ при различных значениях K_k . Кривая 1 соответствует максимальному значению $P_{\text{кав max}}$, т.е. $K_k = 0,4$ и соответствует режиму течения, при котором преобладает влияние кориолисовых сил. Кривая 2 соответствует преобладанию центробежных сил ($K_k = 1,1$). Очевиден различный характер роста интенсивности кавитации. Кривая 1 при увеличении ΔP имеет более крутой характер, чем кривая 2. Причем кривая 2 начиная с $\Delta P \approx 2,8 \cdot 10^5$ Па возрастает незначительно, по крайней мере в исследованном диапазоне параметров ΔP и K_k . Следовательно эффективнее работать при $0,3 \leq K_k \leq 0,5$, при максимально достижимых величинах ωR_2 и $\Delta P(V)$.

На основании полученных результатов по кавитационному исследованию можно сделать вывод: для повышения эффективности работы роторного аппарата необходимо с одной стороны увеличивать величину ωR , что повышает количество актов воздействия на обрабатываемую среду в единицу времени, с другой стороны, необходимо увеличивать величину ΔP , т.е. расход через аппарат, чтобы обеспечивать значение критерия K_k в пределах $K_k = 0,3 \dots 0,5$. Однако отметим, что оба этих действия приводят к увеличению потребляемой мощности роторным аппаратом, причем от угловой скорости она зависит $N \sim \omega^{2,5 \dots 2,7}$ [28], а от расхода увеличивается прямо пропорционально с коэффициентом, зависящим от других конструктивных параметров [7].

В случае, когда производительность задана техническим заданием на конкретный ХТП, с точки зрения повышения эффективности роторного аппарата необходимо увеличивать угловую скорость вращения ротора, опять же, ограничивая ее потребляемой мощностью, т.е. удельными энергозатратами.

2.4. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАСТВОРЕНИЯ NaCl

В результате экспериментального исследования процесса растворения получены зависимости изменения концентрации от времени. Для оценки эффективности процесса растворения определялся коэффициент скорости растворения K , полученный интегрированием формулы Шукарева [29 – 34].

Так как природная каменная соль растворяется по диффузионному закону [29], то для определения коэффициента скорости растворения K используется уравнение, полученное интегрированием формулы Шукарева:

$$K = \frac{V}{Ft} \ln \frac{C_s - C_1}{C_s - C_x}, \quad (2.20)$$

где V – объем; C_1 , C_x , C_s – концентрации растворяемого вещества в начальный момент, к моменту времени t и концентрация насыщения.

Площадь поверхности контакта фаз F определялась для засыпки, исходя из гранулометрического состава продукта, по следующей методике. Средняя площадь поверхности i -й фракции равна

$$\Delta F_{\text{icp}} = \frac{1}{\Delta d_i} \int_{d_i}^{d_i + \Delta d_i} F_{\text{icp}} \partial d_i. \quad (2.21)$$

Принимая форму частиц соли кубической [29, 35], получаем, что средняя площадь поверхности одной частицы i -й фракции равна

$$F_{\text{icp}} = 6d_{\text{icp}}^2.$$

Подставив в уравнение (2.21) значение F_{icp} и решив его относительно d_{icp} , получим средний размер частицы i -й фракции

$$d_{\text{icp}} = \sqrt{d_i^2 + \Delta d_i d_i + \frac{\Delta d_i^2}{3}}.$$

С другой стороны, средняя площадь поверхности i -й фракции равна

$$\Delta F_{\text{icp}} = 6d_{\text{icp}}^2 n,$$

где n – количество частиц в i -й фракции.

$$n_i = \frac{\Delta m_i}{m_i}.$$

где Δm_i – масса i -й фракции; m_i – масса 1 частицы.

Так как

$$m_i = \rho_{\text{т}} d_i^3,$$

где $\rho_{\text{т}}$ – плотность кристалла природной соли, окончательно для i -й фракции получаем

$$\Delta F_{i\text{ср}} = \frac{6\Delta m_i}{\rho_1 d_{i\text{ср}}} \quad (2.22)$$

Полная поверхность контакта фаз для одной засыпки определяется как

$$F = \sum_{i=1}^N \Delta F_{i\text{ср}}.$$

Коэффициент скорости растворения определяется в начале процесса растворения, когда $C_x \ll C$.

Положение о постоянстве коэффициента скорости растворения [29, 30, 34] при объемном выражении концентрации вытекает из самой сущности процесса растворения, состоящего из реакции на границе раздела двух фаз и встречной транспортировки растворенных веществ и растворителя в трехмерном пространстве.

При выражении концентрации в весовых процентах коэффициенты скорости растворения значительно возрастают с увеличением концентрации солей в растворе.

По нашим данным и данным других исследователей [15] при объемном выражении концентрации солей, диффузионно-растворяющихся в собственных растворах разных концентраций, при прочих одинаковых условиях протекания процесса (например t , P , ω , δ и т.п.) K остаются практически постоянными, их изменения определяются лишь пределами влияния температурного эффекта растворения.

2.4.1. ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КАВИТАЦИИ НА СКОРОСТЬ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ

Известно [7, 11 – 13, 35], что в режиме максимально развитой кавитации скорость массопереноса должна быть максимальной. Экспериментальные исследования подтвердили это предположение. Из кавитационных исследований следует, что интенсивность кавитации растет с увеличением угловой скорости вращения ротора и с уменьшением зазора. Характерные кинетические кривые растворения (рис. 2.31 и 2.32) показывают, что, действительно, скорость растворения увеличивается с ростом интенсивности

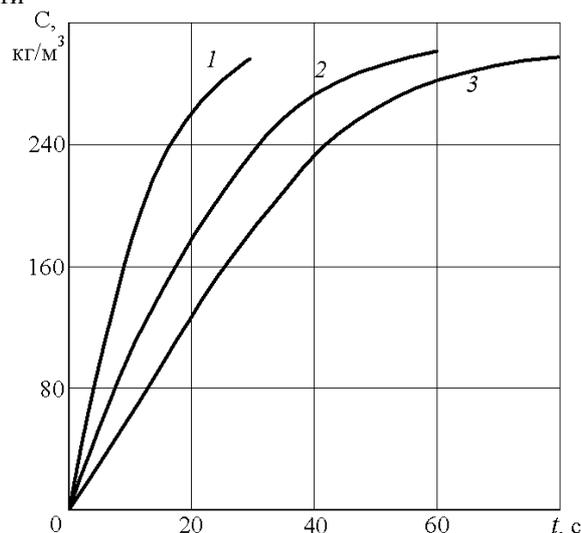


Рис. 2.31. Зависимость концентрации NaCl от времени при различных относительных радиальных зазорах:
 $\Omega = 240 \text{ с}^{-1}$, $P_k = 4,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $l / a_p = 2$; $1 - \delta_a = 0,01$; $2 - \delta_a = 0,02$; $3 - \delta_a = 0,03$

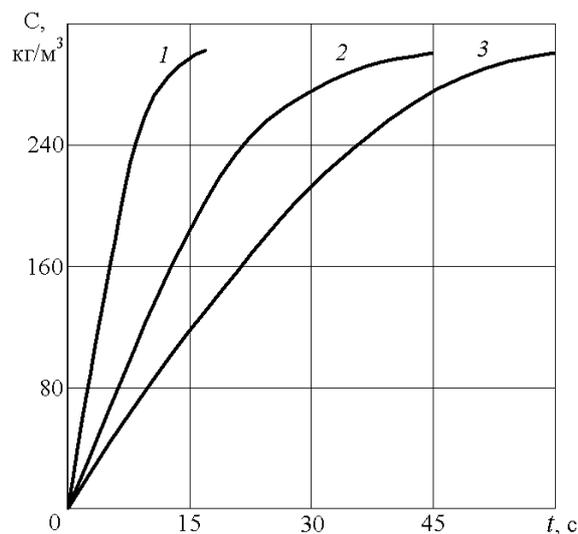


Рис. 2.32. Зависимость концентрации NaCl от времени при различных давлениях в камере озвучивания:

$$\Omega = 240 \text{ с}^{-1}, \delta_a = 0,01; l/a_p = 2; 1 - P_k = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

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

кавитации. Согласно данным, полученным в п. 2.3.1 максимум кавитационных импульсов давления наблюдается в камере озвучивания $P_k = 2,6 \cdot 10^5$ Па, а при $P_k > 2,6 \cdot 10^5$ Па отсутствует. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что расчет аппарата следует вести на такой режим, при котором в нем наблюдается максимум кавитации.

2.4.2. ВЛИЯНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА НА СКОРОСТЬ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ

В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости коэффициента скорости растворения, изображенные на рис. 2.33 и 2.34. Давление $P_k = 2,6 \cdot 10^5$ Па соответствует режиму максимально развитой кавитации.

На графиках наблюдаются четко выраженные максимумы и минимумы. Анализируя совместно графики спектральной плотности (рис. 2.13 –2.17) и графики коэффициента скорости растворения, можно сделать вывод о том, что интенсифицирующее действие на процесс растворения оказывают резонансные частоты, определяемые формулой (1.2) при $k = 1$. Кроме того, это подтверждено численными расчетами резонансных частот в п. 2.2.1.

Следует отметить, что кривая 1 соответствует отсутствию кавитации, при этом перепад давления между полостью ротора и камеры озвучивания невелик и резонансные явления не оказывают значительного влияния на скорость процесса растворения.

Таким образом, возникновение резонансного режим в роторном аппарате повышает эффективность его работы при проведении массообменных процессов, по крайней мере, в процессах, лимитируемых скоростью диффузии. Это служит основанием для использования выражения (1.2) при проектировании роторных аппаратов.

Из анализа кинетических кривых на рис. 2.33 и 2.34 следует практическое значение резонансного режима. Как показано в работе [28], потребляемая мощность роторного аппарата $N \sim \omega^{2,5...2,7}$. Из графиков 2.33 и 2.34 следует, что одну и ту же скорость растворения можно получить при различных угловых скоростях вращения ротора. Таким образом, можно снизить энергозатраты на проведение массообменных процессов.

Например, при $\delta_a = 0,01$ скорость растворения при $\omega = 157 \text{ с}^{-1}$ и $\omega = 235 \text{ с}^{-1}$ одинакова, т.е., работая при $\omega = 157 \text{ с}^{-1}$, можно получить выигрыш в потребляемой мощности роторным аппаратом почти в три раза.

Таким образом, работа роторного аппарата в резонансном режиме позволяет снизить удельные энергозатраты, т.е. повысить его эффективность.

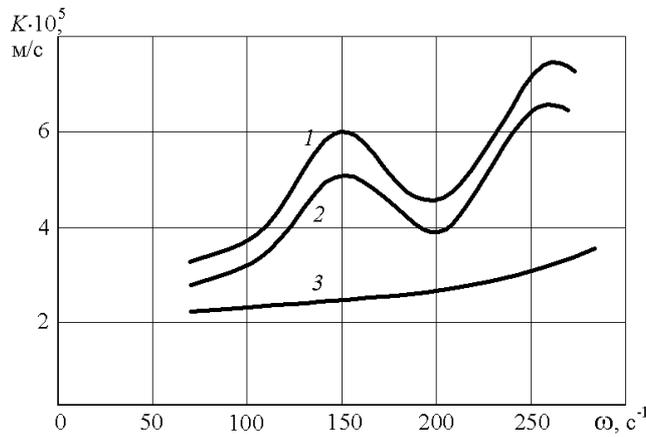


Рис. 2.33. Зависимость коэффициента скорости растворения от угловой скорости вращения ротора:
 $\delta_a = 0,01$; $l/a_p = 2$; $1 - P_k = 2,6 \cdot 10^5$ Па; $2 - P_k = 1,5 \cdot 10^5$ Па; $3 - P_k = 4,5 \cdot 10^5$ Па

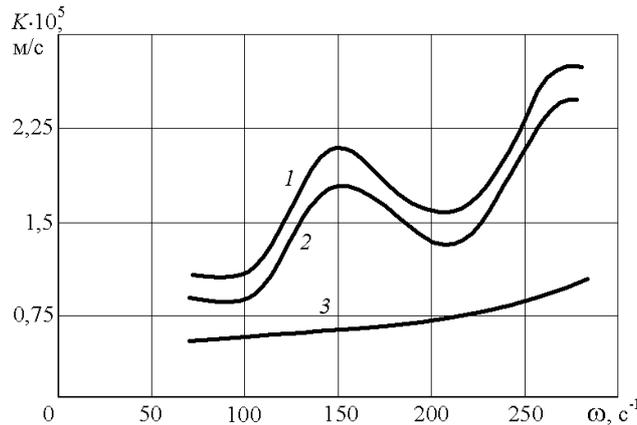


Рис. 2.34. Зависимость коэффициента скорости растворения от угловой скорости вращения ротора:
 $\delta_a = 0,04$; $l/a_p = 2$; $1 - P_k = 2,6 \cdot 10^5$ Па; $2 - P_k = 1,5 \cdot 10^5$ Па; $3 - P_k = 4,5 \cdot 10^5$ Па

2.4.3. ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА NaCl НА СКОРОСТЬ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ

Все природные материалы, используемые в процессах растворения, характеризуются большим различием в величине растворяющихся частиц, т.е. используемые соли являются полидисперсными. Известны данные о влиянии фракционного состава растворяемой смеси на скорость растворения [29].

Проведены эксперименты с целью учета влияния различного фракционного состава: от 3 до 2,5; 2,5...2; 2,0...1,4; 1,4...1,0; 1,0...0,5; 0,5...0. Зависимости изменения концентрации соли в зависимости от времени растворения представлены на рис. 2.35.

Растворение проводилось в одинаковых условиях, т.е. при постоянных значениях P_k , ω , δ , Q . Как видно из графика, наибольшую скорость растворения, т.е. изменения dC/dt имеет фракция от 0,5...0, а наименьшую – полидисперсная смесь.

По экспериментальным данным построен график изменения относительной скорости растворения полидисперсной смеси исходного грансостава (рис. 2.36).

С увеличением диаметра частиц в смеси относительная скорость растворения падает. Этот факт следует из уравнения Щукарева. Так как мы принимали в уравнении (2.20) $K = \text{const}$, то изменение скорости растворения может быть обусловлено, при той же разности концентраций, только изменением величины поверхности контакта фаз. Из уравнения (2.22) для определения поверхности контакта фаз следует, что при прочих равных условиях, т.е. постоянных Δm_i , ρ_T , чем меньше d_{icp} , тем больше поверхность контакта фаз. Увеличение скорости растворения для фракции 2,5...3 мм объясняется тем, что величина частиц соли больше ширины отверстия в статоре. Закупоривание отверстий частицами при этом, наблюдавшееся по резкому возрастанию давления в полости ротора, приводит к особенно благоприятным условиям растворения. В этом случае скорость обтекания оказывается максимальной, кроме того, возрастает механическое диспергирование твердых частиц. Однако для промышленной эксплуатации это условие $d_{i_{max}} > a_c$ нецелесообразно из-за опасности закупоривания аппарата. Такой же результат получен в работе [35].

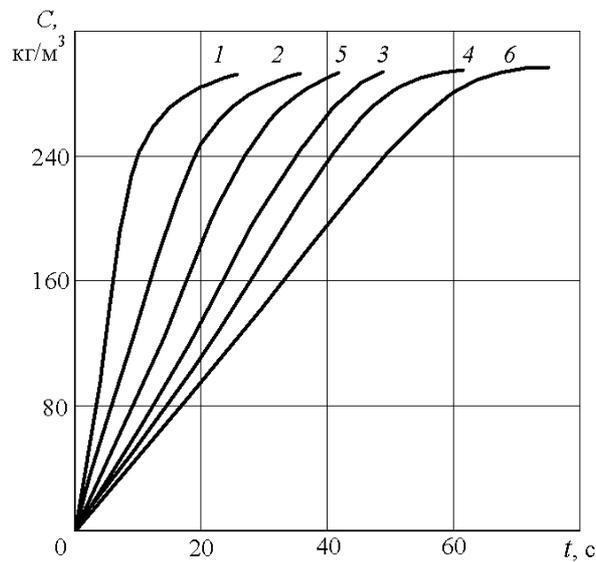


Рис. 2.35. Зависимость концентрации NaCl от времени для смесей различного фракционного состава:

$\delta_a = 0,04$, $\omega = 262 \text{ c}^{-1}$, $P_k = 4,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 1 – $0 \leq d_r \leq 0,5$; 2 – $0,5 \leq d_r \leq 1,0$; 3 – $1,0 \leq d_r \leq 1,4$; 4 – $2,0 \leq d_r \leq 2,5$; 5 – $2,5 \leq d_r \leq 3,0$; 6 – полидисперсная соль

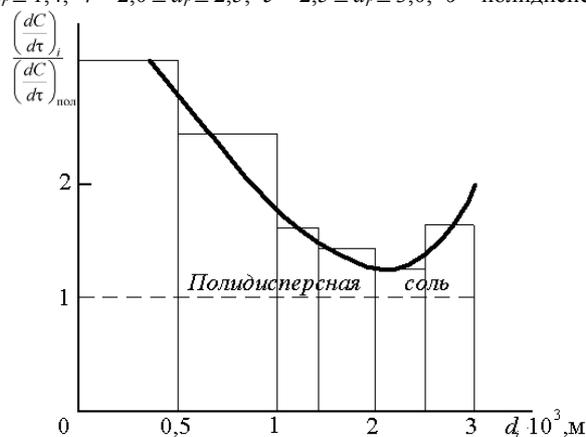


Рис. 2.36. Зависимость относительной скорости растворения от фракционного состава соли:

$P_k = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $\omega = 251 \text{ c}^{-1}$; $\delta_a = 0,4$; $l/a_0 = 2$

Для промышленных условий можно рекомендовать соотношение максимальных частиц во фракции с шириной каналов в роторе и статоре как $a_c > d_{i_{\max}}$. По возможности необходимо применять для растворения смеси более узкого фракционного состава, так как в этом случае скорость процесса растворения всегда будет больше, чем в случае смеси полидисперсного состава.

2.4.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ОТВЕРСТИЙ В СТАТОРЕ НА СКОРОСТЬ РАСТВОРЕНИЯ

В целях снижения гидравлического сопротивления в аппарате конструкции МИХМ каналы в статоре были выполнены под острым углом по направлению вращения ротора.

В результате экспериментов по растворению соли при разном угле наклона каналов в статоре, изменявшихся направлением вращения ротора, получено, что скорость растворения при этом не изменилась.

Можно рекомендовать изготавливать аппараты с нерадиальными каналами в статоре по направлению вращения ротора. При этом снижается гидравлическое сопротивление роторного аппарата, а скорость процесса массопередачи остается практически неизменной.

2.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ И ВЛИЯНИЕ ПОЛУЧЕННОЙ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

2.5.1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СУЩЕСТВУЮЩИХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

В последнее десятилетие значительно возрос интерес к смазочно-охлаждающим жидкостям (СОЖ) для обработки металлов резанием. Это объясняется разработкой и внедрением в промышленности новых металлов и сплавов, которые

обладают повышенной механической прочностью, устойчивостью к агрессивным средам, к высоким и низким температурам. Обработка этих материалов оказалась весьма затруднительной, несмотря на появление новых высококачественных инструментальных материалов. Улучшение инструментов и технологии резания позволяет обрабатывать высокопрочные материалы с приемлемой, хотя и весьма низкой производительностью, но получить при этом высокий класс чистоты обработанной поверхности и класс точности изготовления деталей без применения смазочно-охлаждающей жидкости почти не удается.

При удачном выборе СОЖ можно, кроме того, повысить скорость резания и уменьшить износ режущего инструмента.

До недавнего времени очевидное внимание специалистов было сосредоточено на разработке новых составов СОЖ. Сейчас, когда производство и номенклатура СОЖ резко возросла, стал актуальным вопрос об улучшении качества существующих смазочно-охлаждающих жидкостей.

Смазочно-охлаждающие жидкости классифицируют по их химической структуре [26]:

- 1) водные СОЖ, которые разделяются на:
 - а) электролиты;
 - б) водные растворы полимеров;
 - в) водные растворы ПАВ;
- 2) эмульсионные жидкости;
- 3) углеводородные составы.

В настоящее время в машиностроении применяют эмульсии типа "масло в воде". Концентрат эмульсии, разбавляемый водой, называют эмульсолом. Они включают в себя эмульгаторы, активные присадки, ингибиторы коррозии, бактерицидные присадки и другие компоненты.

Эмульсии типа "масло в воде" сочетают в себе два ценных качества: большую способность воды к охлаждению и высокую смазывающую способность в ней ПАВ, они менее коррозионны, чем водные.

Углеводородные СОЖ обладают, как правило, высокими смазывающими свойствами, но плохо охлаждают инструмент, и их применяют только в тех случаях, когда требуются повышенные противозадирные и противоизносные свойства, но при условии, что процесс не сопровождается большим тепловыделением.

Наиболее подходящим во всех отношениях (стоимость, технологические свойства) являются эмульсии типа "масло в воде".

2.5.2. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ЭМУЛЬСИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Технология приготовления эмульсии "масло в воде" включает две основные стадии:

- 1) подготовка воды;
- 2) диспергирование эмульсолов.

Подготовка воды заключается в ее умягчении, обеззараживании и нагревании до определенной температуры.

Для приготовления СОЖ используют различные методы: смешение с использованием турбинных и пропеллерных мешалок, а также с помощью пара или сжатого воздуха, использованием гомогенизаторов, смешение в коллоидных мельницах, ультразвуковое диспергирование с применением магнитострикционных вибраторов и роторных аппаратов.

В таблице 1 приведены размеры частиц эмульсий в зависимости от методов перемешивания [40].

Из рассмотренных способов приготовления СОЖ наиболее перспективным является способ с наложением колебаний звукового поля [40].

Таблица 1

Тип аппарата	Для эмульсий с концентрацией %		
	1	5	10
	Средние размеры частиц, мкм		
Пропеллерная мешалка	1	3...8	2...5
Турбинная мешалка	2...9	2...4	2...4
Коллоидная мельница	6...3	4...7	3...5
Гомогенизатор	1...3	1...3	1...3

При приготовлении СОЖ важен выбор ультразвуковой аппаратуры и оценка ее по всем параметрам.

Применение пьезоэлектрических или магнитострикционных вибраторов невыгодно из-за сложности и дороговизны аппаратуры и относительно низкой удельной производительности.

Гидродинамические вибраторы, типа свитка Польшмана, обладают относительно небольшой производительностью (до 800 л/ч).

Наиболее пригодным для приготовления СОЖ является роторный аппарат [7, 11–13]. За счет интенсивного перемешивания, возникновения мощной импульсной кавитации и механического диспергирования эмульсия получается тонкодисперсной, стабильной. Роторные аппараты обладают повышенной производительностью (10...20 м³/ч) по сравнению со всеми другими типами оборудования, применяемого для приготовления СОЖ.

2.5.3. ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИИ НА КАЧЕСТВО ПОЛУЧАЕМОЙ СОЖ

Для подтверждения влияния кавитации на дисперсность эмульсии проводились эксперименты при различных стадиях развития кавитации. В исследованном роторном аппарате (рис. 2.1) кавитация возникает при давлении в камере

$P_k = (3,5...4,3) \cdot 10^5$ Па (в зависимости от скорости вращения ротора) достигает максимума при $P_k = (2,3...2,6) \cdot 10^5$ и снижается при $P_k = 1,5 \cdot 10^5$ Па. Для этих случаев были проведены эксперименты, результаты которых изображены на рис. 2.37. Анализируя этот график, можно сделать вывод, что кавитация оказывает интенсифицирующее действие на процесс диспергирования.

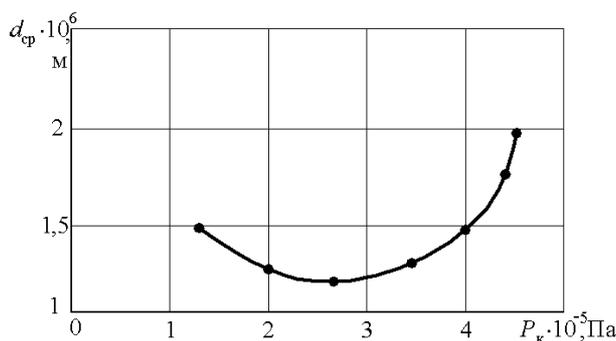


Рис. 2.37. Влияние статического давления на среднеарифметический диаметр частиц эмульсола:

$\delta_a = 0,01$; $Q = 0,00315$ м³/ч

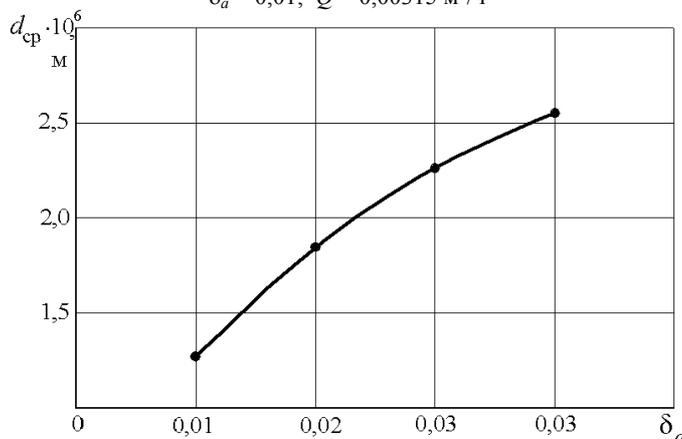


Рис. 2.38. Зависимость среднеарифметического диаметра частиц эмульсола от радиального зазора:

$P_k = 2,6 \cdot 10^5$ Па; $\omega = 200$ с⁻¹

При давлении в камере $P_k = 4,5 \cdot 10^5$ Па, когда кавитация отсутствует, наблюдается возрастание среднеарифметического диаметра частиц. Величина зазора оказывает существенное влияние на интенсивность кавитации. Экспериментальные данные о влиянии величины зазора на дисперсность эмульсии приведены на рис. 2.38.

С увеличением зазора наблюдается довольно резкое увеличение среднеарифметического диаметра частиц, причем, при $\delta = 0,17$ мм проявляется тенденция к стабилизации среднеарифметического диаметра. С увеличением зазора интенсивность кавитации снижается, что и приводит к увеличению среднеарифметического диаметра частиц.

Таким образом, наши данные и данные других авторов позволяют сделать вывод о том, что при диспергировании эмульсий основное влияние на ее дисперсность, а следовательно, и на качество оказывает импульсная акустическая кавитация.

Все приготовленные эмульсии контролировались на стабильность. Они показали хорошую устойчивость к расслаиванию. Через шесть суток после приготовления СОЖ заметных выделений масла на поверхности эмульсии не замечалось.

Таким образом, из всех проведенных экспериментов по диспергированию эмульсола для приготовления СОЖ можно сделать вывод, что кавитация оказывает существенное влияние на качество получаемой эмульсии. Причем оптимальным, с точки зрения получения более тонкодисперсной эмульсии, является режим акустической импульсной кавитации.

2.5.4. ВЛИЯНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА НА КАЧЕСТВО ПОЛУЧАЕМОЙ СОЖ

В п. 1.3 подробно объяснен механизм движения частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде в случае возникновения в объеме стоячей волны. Этот механизм можно применить для процесса эмульгирования, считая, что $\rho_z < \rho_v$, где ρ_z и ρ_v – плотность частиц эмульсола и воды, соответственно.

Таким образом, в системе Ж-Ж происходит движение частиц эмульсола в направлении пучности колебаний стоячей волны, что должно способствовать процессу коагуляции. Процесс коагуляции должен увеличивать размеры частиц дисперсной фазы.

роторном аппарате в условиях слабой кавитации ($P_k = 1,5 \cdot 10^5$ Па), увеличила стойкость резца в 1,5 раза. В среднем при всех режимах приготовления СОЖ с использованием роторного аппарата стойкость резцов из стали Р18 возросла на 30 %.

Для выяснения влияния качества СОЖ на шероховатость поверхности проведены эксперименты по определению зависимости качества поверхности при различных способах приготовления СОЖ (рис. 2.41). Кривая 1 – СОЖ, полученная на заводской установке, кривая 2 – СОЖ, полученная в роторном аппарате ($P_k = 2,6 \cdot 10^5$ Па, $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м). Видно, что при увеличении скорости резания качество поверхности ухудшается, затем при увеличении скорости резания $V > 60$ качество поверхности резко улучшается. Это объясняется тем, что до скорости резания $V = 60$ м/мин появляются наросты в зоне скоростного резания. При повышении скорости эти наросты срываются со стружкой или не успевают образовываться.

Использование СОЖ позволило увеличить чистоту обрабатываемой поверхности стали 45 на один класс.

Использование РАМП для приготовления СОЖ позволило отказаться от нагрева эмульсола до 40...60 °С. Это позволяет снизить энергозатраты при изготовлении СОЖ.

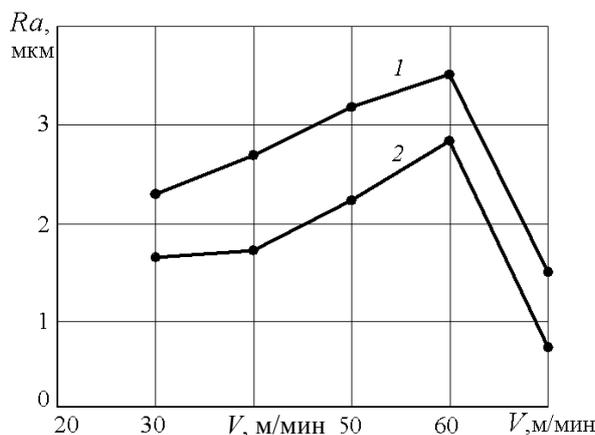


Рис. 2.41. Зависимость шероховатости обработанной поверхности образцов стали 45 от скорости резания при различных способах приготовления СОЖ:

1 – заводская СОЖ; 2 – СОЖ, приготовленная на роторном аппарате

Все полученные результаты позволяют рекомендовать роторный аппарат для эффективного приготовления смазочно-охлаждающей жидкости, а также для других процессов диспергирования в системах "жидкость-жидкость".

2.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ РОТОРНЫМ АППАРАТОМ

В п. 2.5.2 работы [1] получены зависимости для определения мощности, потребляемой роторным аппаратом с коническими ротором и статором. Энергозатраты определяются аналитически по выражению (2.217) [1]. Составляющие выражения определяются: N_k – по зависимости (2.215) [1], $N_{з.р.}$ – по (2.209) [1], $N_{з.о.}$ по (2.212) [1], N_m – по (2.216) [1].

Значение $G'(\xi_0)$ в выражении (2.212) [1] определяется согласно методики, предложенной в п. 2.5.1 работы [1] при $\nu = 10^{-6}$ м²/с; $\delta = 10^{-4}$ м; $\gamma = \pi/30$ (6°). Полученные результаты изображены на рис. 2.42.

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что основной вклад в энергозатраты вносит мощность, потребляемая на сообщении кинетической энергии жидкости в роторе ~55 % и мощности, диссипируемые в радиальном и осевых зазорах примерно по 20 % каждая.

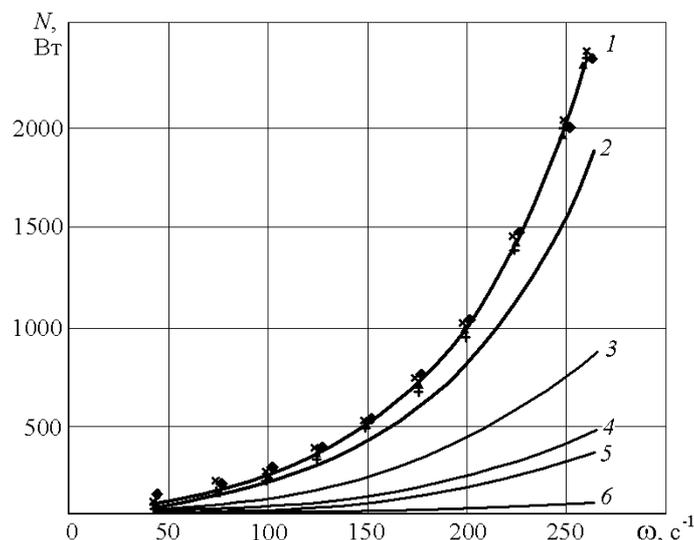


Рис. 2.42. Зависимость потребляемой мощности от частоты вращения ротора: 1 – экспериментальная; 2 – N ; 3 – N_k ; 4 – $N_{з.р}$; 5 – $N_{з.о}$; 6 – N_m ;

◆ – $\Delta P = 2,75 \cdot 10^5$ Па; × – $\Delta P = 2,4 \cdot 10^5$ Па; + – $\Delta P = 2,15 \cdot 10^5$ Па; ▲ – $\Delta P = 1,65 \cdot 10^5$ Па

Экспериментальное определение мощности проводится по методике, описанной в п. 2.1.2. Полученная зависимость также представлена на рис. 2.42.

Экспериментальная кривая лежит выше теоретической на (8...12) %. Это расхождение объясняется тем, что, во-первых, не учтена радиальная скорость течения жидкости при определении N_k , т.е. используется выражение (2.215), а не (2.213) из работы [1]. Это вызвано тем, что на начальном этапе проектирования ее невозможно определить. Во-вторых, не учтена диссипация энергии в каналах модулятора. Однако, при выборе электродвигателя по потребляемой мощности обычно используют двигатель большей номинальной мощности. Следовательно, полученные расхождения между теоретическими и экспериментальными данными практически не повлияют на правильность подбора электродвигателя.

Таким образом, предложенная в п. 2.5.2 работы [1] методика определения потребляемой мощности удовлетворительно подтверждается экспериментальными данными. Предложенные зависимости по определению затрат энергии роторным аппаратом предпочтительно использовать на начальной стадии проектирования, например для определения удельных энергозатрат при выборе технологического оборудования.

3. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ РОТОРНОГО АППАРАТА, ОСНОВАННЫЕ НА РЕЗУЛЬТАТАХ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В главах 1 и 2 приведено теоретическое и экспериментальное исследование условий возникновения резонансных явлений в модуляторе и камере озвучивания и доказана эффективность работы роторного аппарата в резонансном режиме. Полученные результаты позволили разработать конструкцию роторного аппарата, в котором реализуется резонансный режим работы и которая была реализована в промышленности [41]. Принципиальная схема показана на рис. 3.1.

Роторный аппарат содержит корпус 1 с патрубком выхода 2, крышку 3 с коаксиально расположенным патрубком 4 входа, скрепленную с корпусом 1, статор 5 с криволинейными каналами 6 в боковой стенке, жестко скрепленный с корпусом 1, крышку 7, уплотняющую каналы 6, жестко скрепленную со статором 5, ротор 8 с каналом 9 в боковых стенках, крышку 10, уплотняющую каналы 9, жестко скрепленную с ротором 8, камеру озвучивания 11, образованную корпусом 2, крышкой 3 и статором 5.

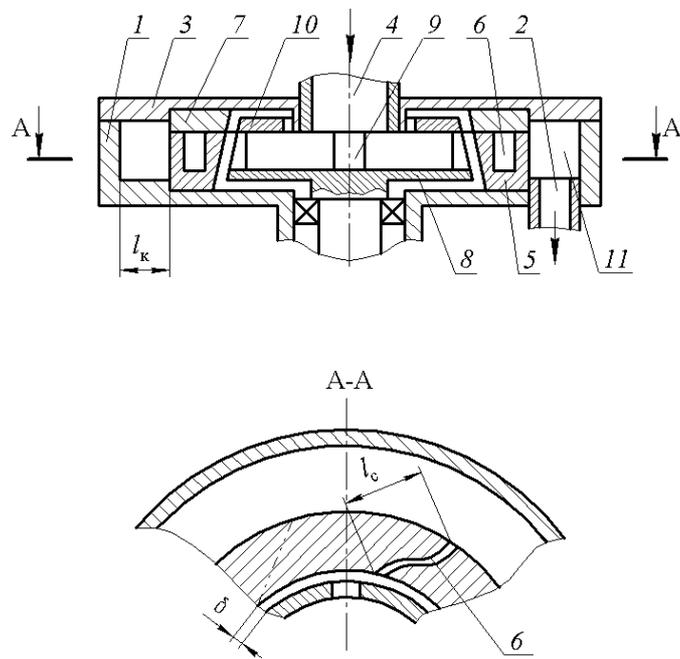


Рис. 3.1. Принципиальная схема конструкция роторного аппарата по SU 1187858

Криволинейность канала 6 статора обеспечивает большее время пребывания частиц обрабатываемой среды в активной зоне непосредственного воздействия импульсных колебаний и интенсивной кавитации. Кроме того, при движении по криволинейным траекториям появляются центробежные силы, тормозящие отдельные объемы потока обрабатываемой среды, что интенсифицирует тепло- и массообмен.

В аппаратах криволинейность каналов статора может быть любой формы. Однако, так как фактором, интенсифицирующим процессы массо- и теплообмена, в данном случае являются возникающие в канале статора стоячие волны, необходимым условием является возможность прохождения волны без отражения от стенок каналов, в противном случае возникает суперпозиция волн, не приводящая к желаемому эффекту, т.е. установлению в каналах статора стоячей волны.

Таким образом, криволинейность канала должна быть такой, чтобы обеспечивалось прямолинейное прохождение акустической волны по каналу.

Конструктивно это условие обеспечивается тем, что каждый канал статора имеет такую криволинейную форму, что через него можно провести хотя бы одну прямую, не касающуюся его боковых стенок; при этом отрезок этой прямой l_c , ограниченный входным и выходным отверстиями канала, равен ширине камеры озвучивания.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что образование когерентных структур при наличии акустического поля (обычно такие поля связаны с различными резонансными условиями) может привести к возникновению стоячих волн. При согласовании частот колебаний, генерируемых в аппарате, с собственной (резонансной) частотой каналов статора и камерой озвучивания возникает резонансный режим работы (см. главу 1).

Наибольший эффект возникает при работе роторного аппарата в этом режиме работы, т.е. при равенстве собственных частот каналов статора и камеры. При этом используются выражения (1.1) – (1.5):

$$f_c = f_k = f.$$

Получаем выражение, необходимое для расчета геометрических размеров аппарата, при которых в нем возможен резонансный режим (1.6).

Для среды "жидкость–твердая фаза" механизм интенсификации процесса следующий.

В поле квазистоячих волн движущиеся частицы ускоряются в сторону пучностей и замедляются в сторону узлов. Эти эффекты увеличивают абсолютную величину скорости обтекания частиц относительно движущейся среды, и увеличивают скорость процессов тепло- и массообмена.

Повышение экономичности процессов в предлагаемом аппарате заключается в том, что появляется возможность работы с меньшей угловой скоростью вращения ротора по сравнению с известным аппаратом (см. главу 2).

В 3 главе работы [1] показано, что существует такое содержание свободного газа в обрабатываемой среде, при котором интенсивность импульсной акустической кавитации максимальна, т.е. скорость технологических процессов наибольшая. Поэтому для повышения эффективности проведения технологических процессов в жидкой проточной среде, ведущее к снижению времени обработки сырья в роторном аппарате и получения более качественного продукта за счет оптимизации импульсного гидродинамического и акустического воздействия на обрабатываемую среду разработана следующая конструкция [42].

В устройстве для физико-химической обработки жидкой среды, содержащем корпус с патрубками входа и выхода среды, коаксиально установленные в нем ротор и статор, с каналами в боковых стенках, камеру озвучивания и привод, во входном патрубке установлен дополнительный патрубок и насадок в виде трубы Вентури с отверстиями, равномерно расположенными на боковой поверхности суженной части, а расстояние между центрами отверстий и началом сужения не более диаметра суженной части, для подачи свободного газа в жидкую проточную среду или его отбора из нее. В статоре

выполнены дополнительные каналы, входы которых соединены с каналами в боковой стенке статора со стороны линейной скорости боковой рабочей поверхности ротора.

Критерий кавитации, характеризующий протекание процесса кавитации, зависит от скорости жидкости или объемного расхода, регулируемого вентилем 6 на входном патрубке 5; давления жидкости в камере озвучивания 12, которое регулируется вентилем 3 на выходном патрубке 2. Они же определяют величину отрицательного ускорения жидкости в каналах 10 статора 9. Для оптимизации интенсивности кавитации и, следовательно, эффективности проведения технологического процесса необходимо регулировать концентрацию свободного (нерастворенного) газа в жидкой среде. Для этого во входной патрубке 5 помещается насадок в виде трубы Вентури 17, с отверстиями в узкой части 18, и дополнительный патрубок 15 с вентилем 16, а также выполняются каналы 11 в статоре 10, соединяющиеся с коллектором 13 и каналами в боковой стенке статора 10 со стороны направления линейной скорости боковой рабочей поверхности ротора 7. Концентрация свободного газа изменяется с помощью вентиля 14 и 16.

Жидкая среда, проходя через насадок в виде трубы Вентури 17, образует в наиболее узкой части паровоздушную кольцевую полость, начинающуюся от начала суженной части и имеющую центр примерно на расстоянии, равном диаметру от входа в сужение, в которой наблюдается вакуум. В паровоздушную полость можно подавать или отбирать из нее через отверстия 18 свободный газ, т.е. увеличивать или уменьшать концентрацию свободного газа в жидкости.

Расстояние между центрами отверстий и началом сужения не более диаметра суженной части трубы Вентури. Отверстия располагаются равномерно по поверхности суженной части насадка. Отметим, что в случае необходимости добавлять свободный газ в обрабатываемую среду, он подается без дополнительных устройств за счет вакуума, образующегося в паровоздушной полости. В отверстиях статора также можно регулировать концентрацию свободного газа в обрабатываемой среде, отбирая или подавая газ в паровоздушную полость, образующуюся у боковой стенке канала 10 статора 9 со стороны минимального давления, через коллектор 13 и дополнительные каналы 11.

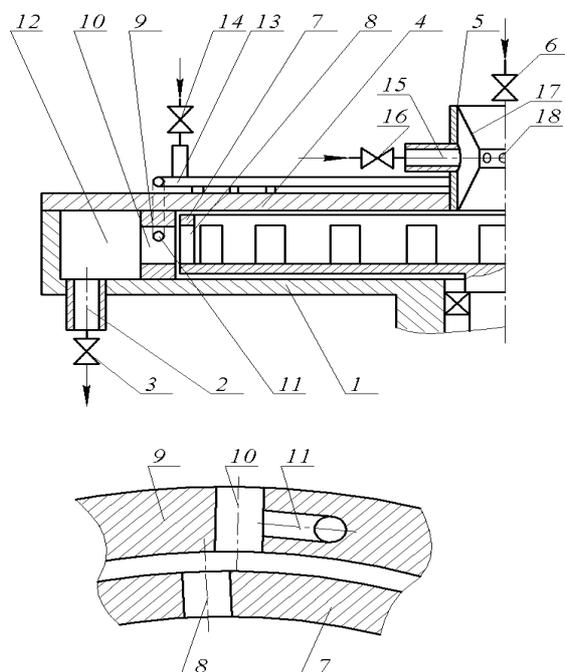


Рис. 3.2. Принципиальная конструкция роторного аппарата по RU 2287360

Предложенное устройство позволяет при обработке жидкой среды поддерживать оптимальное кавитационное воздействие на скорость технологического процесса. При недостатке свободного газа его подают в обрабатываемую среду через дополнительный патрубок во входном патрубке устройства и через коллектор и дополнительные каналы в статоре во все каналы статора с помощью компрессора. Если концентрация газа в обрабатываемой среде избыточная, то его откачивают насосом через те же элементы конструкции.

Таким образом, независимо от концентрации свободного газа в обрабатываемой среде гидродинамическая и акустическая кавитации оказывают максимальное воздействие на проводимый технологический процесс.

Для повышения эффективности кавитационного воздействия на скорость технологических процессов предложена следующая конструкция роторного аппарата [43], изображенного на рис. 3.3.

При обтекании упругих пластин *1* поток среды заставляет их вибрировать с определенной частотой. Частота колебания пластины зависит от длины рабочего участка, способа крепления, скорости потока жидкости и других параметров. Для того чтобы пластина генерировала определенную частоту, ее геометрические параметры рассчитывают по известной методике.

Для выбора наиболее эффективного, с точки зрения кавитации, расположения пластины в конструкции предусмотрено ее радиальное перемещение в канале статора.

В процессе работы аппарата в активной зоне – каналах *2* статора *3* и камере *4* озвучивания – генерируются колебания на двух основных частотах, отличающихся друг от друга на порядок. Это явление вызывает интенсивную кавитацию в каналах *2* статора *3* и камере *4* озвучивания, что интенсифицирует процесс эмульгирования и другие технологические процессы.

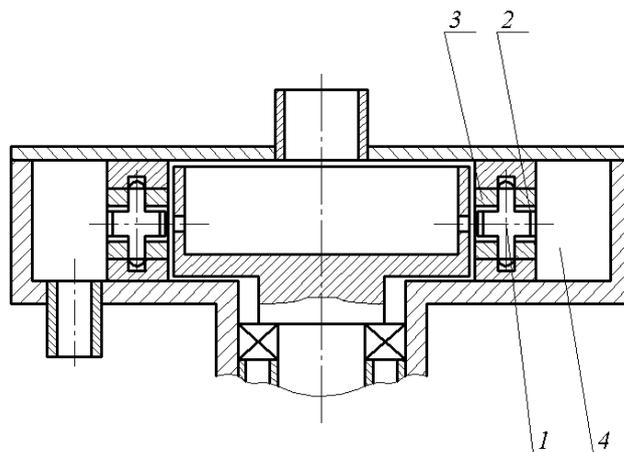


Рис. 3.3. Принципиальная конструкция роторного аппарата по SU 1674942

Основной недостаток аппарата [43] – износ со временем упругих пластин (в местах крепления) и трудоемкость их замены, связанная с разборкой и сборкой аппарата, монтажа подводящих и отводящих трубопроводов и т.д. Недостатком является также наличие дополнительных элементов, усложняющих конструкцию, – пластин и крепежных деталей.

Работа канала статора *2* в качестве генератора акустических колебаний в [44] (рис. 3.4) основана на высокой чувствительности плоских течений к боковому давлению, т.е. при небольшом изменении давления у корня струи она заметно меняет свое направление. При этом тангенциально расположенный цилиндрический резонатор *5* с продольной прорезью можно рассматривать как объемный, частота которого зависит от его диаметра *d* [45]. Одним из основных интенсифицирующих факторов процессов эмульгирования, экстракции и т.п., протекающих в жидкой среде, является кавитация. Для увеличения ее интенсивности желательно, чтобы в обрабатываемой среде генерировались колебания, отличающиеся по основной частоте на 1-2 порядка.

Чтобы основная частота колебаний, генерируемых каналами статора, превышала основную частоту, генерируемую роторным аппаратом, после проведенных расчетов по известной методике получены размеры цилиндрических резонаторов $d = 10...20$ мм при различных сочетаниях геометрических и кинематических параметров существующих роторных аппаратов.

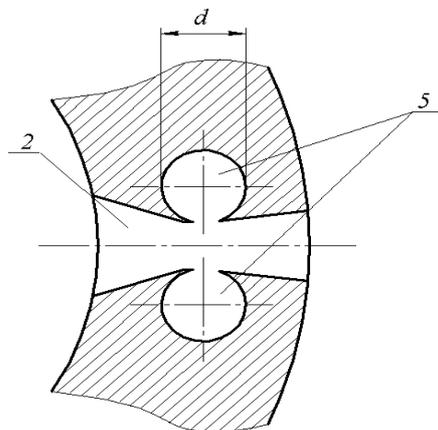


Рис. 3.4. Принципиальная конструкция канала статора роторного аппарата по RU 2165292

Применение предлагаемой конструкции позволит во много раз превзойти долговечность работы роторных аппаратов и их надежность при той же эффективности. Кроме того, за счет отсутствия дополнительных конструктивных элементов – пластин, упрощается сама конструкция, ее изготовление и сборка.

Общим недостатком известных роторных аппаратов является наличие "холостого хода", т.е. времени работы, когда каналы статора перекрыты промежутками между каналами ротора. В этот момент возникают транзитные течения через радиальный зазор между ротором и статором, уменьшающие коэффициент модуляции потока и, в конечном счете, уменьшающие интенсивность акустических колебаний. Для устранения этого недостатка запатентована конструкция [46] изображенная на рис. 3.5.

Интенсификация процессов диспергирования тепло- и массообмена за счет увеличения интенсивности акустических колебаний достигается тем, что в роторном аппарате, содержащем корпус с крышкой и патрубками входа и выхода среды, concentrically установленные в нем ротор и статор с каналами в боковых стенках и камеру озвучивания, каналы в статоре выполнены в виде чередующихся друг с другом глухих и сквозных каналов; глухие каналы снабжены дополнительными каналами, соединяющими их с патрубком входа среды и расположенными в крышке аппарата, при этом $z_p = nz_c$, $n = 1, 3, 5, \dots$ (нечетный ряд чисел) при $z_p > z_c$ и $z_c = nz_p$, $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ (простой ряд чисел) при $z_c > z_p$, где z_p – число каналов в роторе; z_c – число каналов в статоре.

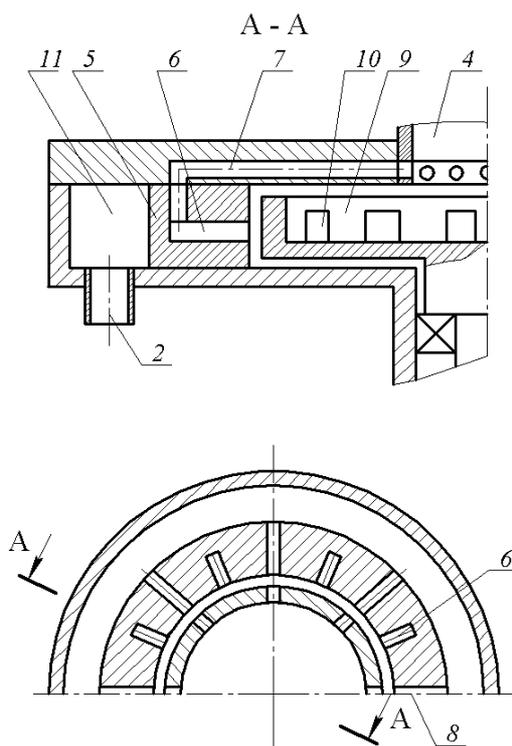


Рис. 3.5. Принципиальная конструкция роторного аппарата по SU 1719045

Обрабатываемая среда поступает через патрубок 4 самотеком в полость ротора 9. Затем возможны два случая следования среды. В первом случае, когда каналы ротора 10 совпадают со сквозными каналами статора 8, среда под действием статического напора и центробежных сил проходит через каналы 10 и 8 в камеру озвучивания 11 и выводится из аппарата через патрубок 2. Во втором случае, когда каналы ротора 10 совпадают с глухими каналами статора 6, среда через каналы 10, 6, 7 поступает в патрубок входа 4. Глухие каналы 6 расположены равномерно между сквозными каналами 8, поэтому при вращении ротора 9 происходит поочередная реализация двух случаев движения обрабатываемой среды.

Известно, что автоколебательные и резонансные режимы работы позволяют более полно использовать энергию колебаний. С целью повышения интенсивности акустических колебаний за счет возникновения автоколебательного резонансного режима работы предложено предварительно модулировать поступающий поток обрабатываемой среды с частотой, равной частоте, генерируемой аппаратом. Это достигается тем, что в период "холостого хода" аппарата, т.е. при перекрытии сквозных каналов статора промежутками между отверстиями ротора, среда через глухие и дополнительные каналы подается на вход аппарата. Таким образом, предварительно промодулированная среда поступает в полость ротора и при открытии сквозных отверстий статора выходит в камеру озвучивания, подвергаясь вторичной модуляции. При этом происходит возрастание амплитуды акустических колебаний. Необходимым условием усиления амплитуды колебаний является равенство частот, генерируемых первичным и вторичным модуляторами. В роторных аппаратах частота акустических колебаний зависит от угловой частоты вращения ротора и числа каналов, следовательно, в предлагаемой конструкции необходимо соблюдение равенства числа глухих и сквозных каналов статора. Кроме того, необходимо поочередное открытие глухих и сквозных отверстий статора, так как при одновременном их открытии только часть среды модулируется в глухих каналах и поступает на вход аппарата. Другая, большая часть (за счет разных гидравлических сопротивлений сквозных и глухих каналов) проходит в камеру озвучивания, подвергаясь только однократной модуляции.

Для каждого технологического процесса существует вполне определенная оптимальная частота налагаемых акустических колебаний, при которой он протекает наиболее быстро и качественно, т.е. в существующих конструкциях невозможно сократить время "холостого хода" простым увеличением числа каналов (изменится частота колебаний). В предлагаемой конструкции при неизменной частоте колебаний значительно уменьшается время "холостого хода" за счет наличия глухих и дополнительных каналов в статоре и, следовательно, уменьшается транзитное течение, за счет чего также растет интенсивность акустических колебаний. Таким образом, в предлагаемом аппарате более полно используется рабочее время, т.е. повышается его КПД.

К преимуществам предлагаемой конструкции также следует отнести увеличение времени пребывания обрабатываемой среды в аппарате за счет ее прохождения через глухие и дополнительные каналы в период "холостого хода". Это способствует интенсификации технологического процесса.

С целью увеличения турбулизации потока обрабатываемой среды запатентован аппарат с переменным поперечным сечением канала статора [47], пример исполнения которого показан на рис. 3.6.

Переменное поперечное сечение канала по длине обеспечивает изменение скорости течения среды: в сужении она больше, в расширении – меньше. При этом возникают турбулентные пульсации с произвольно направленными векторами скоростей. Это вызывает увеличение относительной скорости обтекания твердых частиц, т.е. разницы скорости среды и частицы, в обрабатываемой среде за счет сил инерции. Увеличение относительной скорости обтекания уменьшает диффузионный слой частицы и, следовательно, увеличивает скорость процесса массообмена.

Кроме того, при срыве канала в этих областях развивается гидродинамическая кавитация, интенсифицирующая процессы массообмена.

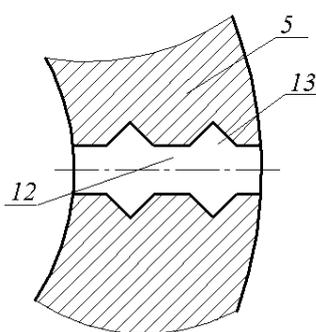


Рис. 3.6. Принципиальная конструкция канала статора роторного аппарата по SU 1389830

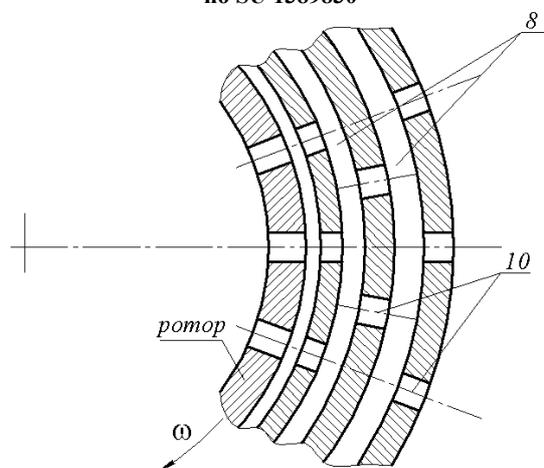


Рис. 3.7. Принципиальная конструкция модулятора роторного аппарата по RU 2150318

Использование переменного поперечного сечения канала статора вызывает возникновение циркуляционных, вихревых потоков среды в области расширения, что увеличивает турбулизацию потока и время пребывания обрабатываемой среды в активной зоне – каналах статора.

Для одновременного воздействия стоячих волн, возникающих при резонансном режиме работы, и турбулентных пульсациях на скорость массообменных процессов служит схема модулятора аппарата [48], изображенного на рис. 3.7, который является дальнейшим совершенствованием предыдущего изобретения.

В роторном аппарате, содержащем корпус с патрубками входа и выхода среды, концентрично установленные в нем ротор и статор с каналами в боковых стенках в виде чередующихся сужений расширений, камеру озвучивания и привод, отличающийся тем, что расширения каналов статора выполнены в виде кольцевых проточек, а сужения смещены относительно друг друга, причем радиальная ось каждого последующего сужения в радиальном направлении смещена относительно предыдущего на угол $\alpha = \frac{\pi}{z_c}$, где z_c – число каналов статора и длина каждого сужения равна длине кольцевой проточки в радиальном направлении.

Исполнение канала статора в виде сужений и расширений обеспечивает изменение скорости течения среды: в сужении она больше, а в расширении – меньше. При этом возникают турбулентные пульсации с произвольно направленными векторами скоростей, что вызывает увеличение относительной скорости обтекания частиц гетерогенной среды. Увеличение относительной скорости обтекания уменьшает диффузионный слой и увеличивает касательные напряжения на частице, что приводит к интенсификации процессов эмульгирования, диспергирования и массообмена. Кроме того, при срыве потока при резком расширении канала развивается гидродинамическая кавитация, интенсифицирующая гидромеханические и массообменные процессы.

Форма расширения канала статора в виде кольцевой проточки и смещение сужений относительно друг друга обеспечивает резкое изменение направления потока среды, исключает образование застойных зон и способствует интенсивному смещению потоков в каналах статора.

Соблюдение условий равенства длин участков расширений и сужений приводит к возникновению при определенных условиях стоячих волн в системе сужение-расширение.

В поле стоячих волн движущиеся частицы гетерогенной среды ускоряются в сторону пучностей и замедляются в сторону узлов. Эти эффекты увеличивают абсолютную величину скорости обтекания частиц относительно движущейся среды и интенсифицируют гидромеханические и массообменные процессы.

В некоторых случаях возникновение кавитации нежелательно, например, при производстве химически чистого графита, когда должен быть исключен намол металла. Для интенсификации технологических процессов в роторном аппарате при отсутствии кавитации предложена конструкция роторного аппарата [49], показанная на рис. 3.8.

Каждый канал 1 в роторе 2 выполнен под углом α к образующей боковой поверхности ротора, и его поперечное сечение частично перекрывает поперечное сечение двух или более каналов 3 статора 4, причем угол наклона каналов ротора определяется соотношением

$$\alpha \leq \arctg \frac{h_c}{a_c + b_c},$$

где h_c , a_c – высота и ширина канала статора; b_c – расстояние между каналами статора.

В случае, изображенном на рис. 3.8, б, истечение происходит из двух противоположных участков поперечного сечения каналов статора. В другом случае, изображенном на рис. 3.8, в, истечение происходит из среднего участка канала. В процессе вращения ротора поток обрабатываемой среды проходит и через промежуточные участки истечения. Следовательно, изменяющаяся скорость потока (вследствие изменения площади проходного сечения) и направление вектора скорости (из-за перемещающихся по высоте канала статора участков истечения) вызывает значительную турбулизацию потока среды в активной зоне аппарата – каналах 3 статора, где процессы тепло- и массообмена протекают наиболее интенсивно. Затем поток жидкости поступает в камеру 5 озвучивания, где подвергается дополнительному воздействию акустических колебаний и выводится из аппарата через патрубок 6.

Применение аппарата особенно эффективно при проведении массообменных процессов, скорость которых лимитируется скоростью диффузии. Анализируя основное кинетическое уравнение диффузионных процессов, можно сделать вывод, что интенсификация их достигается уменьшением эффективной толщины диффузионного слоя. Это обеспечивается созданием переменной скорости обтекания частиц, т.е. когда частица участвует в потоке жидкости, изменяющем направление, величину, или когда частица переходит из одного потока в другой с разными векторами скорости.

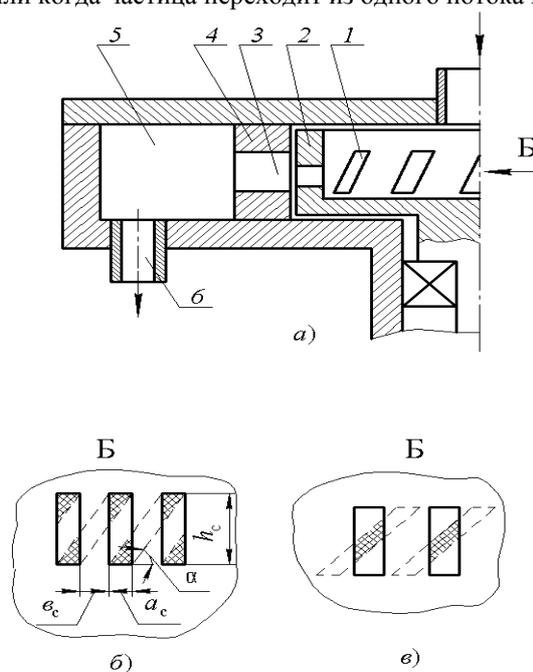


Рис. 3.8. Принципиальная конструкция роторного аппарата с наклонными каналами ротора по SU 1428402:

a – продольное сечение роторного аппарата;

$б, в$ – случаи перекрывания каналов

В предлагаемой конструкции аппарата каналы статора в процессе работы полностью не открываются и не закрываются. Следовательно, пройдя резкое сужение в промежутке ротор–статор поток среды значительно уменьшает скорость движения, и таким образом увеличивается время контактирования частиц с жидкостью в активной зоне – каналах статора. Это является дополнительным фактором, увеличивающим скорость тепло- и массообмена. Так как полость ротора всегда соединена с камерой озвучивания, то это приводит к значительному снижению гидравлического сопротивления аппарата и, как следствие, снижаются энергозатраты на проведение технологического процесса.

Указанное расположение элементов аппарата позволяет устранить возможность возникновения импульсной кавитации. Кавитация в аппаратах подобного типа возникает в случае, когда отверстия статора полностью перекрываются промежутками между отверстиями ротора. В этом случае при периодических открытиях каналов статора возникает большой по величине отрицательный импульс давления, нарушающий сплошность потока жидкости и вызывающий интенсивную кавитацию.

В предлагаемой конструкции аппарата между полостью ротора и камерой озвучивания всегда существуют поток обрабатываемой среды, и получаемый отрицательный импульс давления мал или не возникает, т.е. отсутствует условие возникновения импульсной кавитации.

Повышение эффективности кавитационной обработки технологической среды часто достигают использованием кавитирующих элементов в виде стержней, конусов и т.п. Поэтому был запатентован роторный аппарат, содержащий кавитирующие элементы [50]. Пример установки стержней в канале статора показан на рис. 3.9.

Скорость среды в каналах 1 статора 2 намного больше скоростей в полости ротора и в камере озвучивания, поэтому для увеличения кинетической энергии, затрачиваемой на возбуждение кавитации, кавитирующие стержни 3 установлены в каналах статора.

При обтекании потоком жидкости стержней в канале статора, имеющего небольшой объем по сравнению с камерой озвучивания, возбуждается интенсивная гидродинамическая кавитация. Таким образом, создаются условия для интенсификации процесса эмульгирования, абсорбции и т.д. Кроме того, размещение стержней в канале статора приводит к изменению вдоль его оси площади поперечного сечения потока, что вызывает изменение скорости движения среды и способствует возникновению турбулентных пульсаций с произвольно направленными векторами скоростей, вихревых токов жидкости.

Одним из способов повышения эффективности работы аппаратов с ультразвуковым воздействием на обрабатываемую среду в определенных случаях является повышение частоты колебаний. Поэтому предложена конструкция роторного аппарата, изображенная на рис. 3.10, позволяющая увеличить частоту колебаний без увеличения энергозатрат, за счет особого расположения каналов ротора и статора [51].

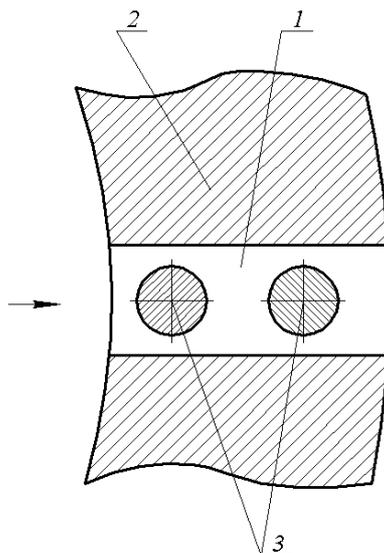


Рис. 3.9. Схема установки кавитирующих стержней в канале статора по SU 2225250

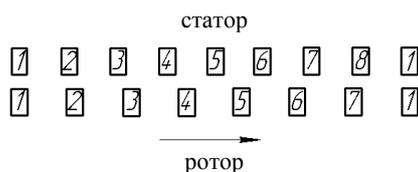


Рис. 3.10. Пример выполнения расположения каналов статора и ротора по SU 2230616

Для увеличения основной частоты колебаний в среде и интенсификации гидромеханических тепло- и массообменных процессов в роторном аппарате, количество каналов в статоре z_c больше количества каналов в роторе z_p и определяются соотношениями $z_c = z_p + k$ и $z_c / z_p \neq k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, а z_c и z_p являются взаимно простыми числами.

Основная частота колебаний, генерируемая роторным аппаратом, определяется по формуле М.А. Балабудкина $f = \omega[z_p, z_c] / 2\pi$, где ω – угловая скорость ротора; $[z_p, z_c]$ – наименьшее общее кратное чисел z_p и z_c .

Из анализа формулы следует, что для значительного увеличения частоты колебаний необходимо выбирать числа z_p и z_c такими, чтобы их отношение не было натуральным числом, т.е. $z_p / z_c \neq 1, 2, 3, \dots$, и чтобы числа z_p и z_c не имели общих делителей, т.е. были взаимно простыми.

Эти соотношения означают, что в данной конструкции обеспечивается несинфазное открытие и закрытие каналов статоров.

Преимущество предлагаемых соотношений заключается в том, что значительное увеличение частоты колебаний происходит без увеличения угловой скорости вращения ротора. Таким образом увеличение частоты колебаний происходит без увеличения энергозатрат, так как мощность, потребляемая роторным аппаратом, пропорциональна квадрату угловой скорости вращения ротора.

При работе роторного аппарата в каждом канале статора генерируются колебания с угловой частотой $\omega_c = \omega z_p$, а в каждом канале ротора с угловой частотой $\omega_p = \omega z_c$. При $z_c = z_p + k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, эти частоты могут различаться незначительно. Таким образом, в предлагаемом устройстве возникают биения – колебания с периодически меняющейся амплитудой, возникающие в результате наложения двух колебаний с несколько различными, но близкими частотами. Если A_1 и A_2 амплитуды двух накладываются колебаний, то при одинаковых фазах колебаний амплитуда результирующего колебания равна $A_1 + A_2$, при противоположных фазах амплитуда результирующего колебания падает до $A_1 - A_2$. Угловая частота $\Omega = \omega_c - \omega_p$ называется угловой частотой биения. Таким образом, предлагаемое устройство позволяет накладывать на обрабатываемую среду колебания с изменяющейся амплитудой. В момент, когда амплитуда биения максимальна, энергия колебания может возрастать почти в четыре раза (например, $k = 1$), так как энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды. Очевидно, что такое импульсное воздействие на обрабатываемую среду, приводит к созданию дополнительных условий, способствующих повышению интенсивности кавитации, которая возникает в роторном аппарате. Это обеспечивает повышение эффективности работы роторного аппарата при проведении гидромеханических тепло- и массообменных процессов. Следует отметить, что в аппаратах с $z_c = z_p$ явление биения не возникает. В устройствах, где $z_c \neq z_p$, но возможно одновременное открытие нескольких отверстий статора, это явление менее заметно.

В предлагаемом устройстве осуществляется только несинфазное открытие всех каналов статора. Это означает, что в любой момент времени одни каналы могут находиться на различной стадии открытия, другие на различной стадии закрытия, третьи каналы могут быть полностью перекрыты промежутками между каналами ротора. Пример выполнения статора и ротора с различным количеством каналов $z_c = 8$, $z_p = 7$ приведен на рис. 3.10.

Из последних конструктивных решений следует отметить те, в которых осуществляется двухступенчатая обработка жидкой среды: предварительная – в полости ротора и окончательная – в модуляторе роторного аппарата.

На рис. 3.11 изображен продольный разрез роторного аппарата [52]. Роторный аппарат содержит корпус 1 с патрубком 2 выхода среды, крышку 3 с патрубком входа 4, статор 5 с каналами 6 в боковых стенках, ротор 7 с каналами в боковых стенках, камеру озвучивания 9, образованную корпусом 1, крышкой 3 и статором 5, конфузур 10 и отражатель 11. Аппарат работает следующим образом: обрабатываемая среда поступает под давлением в патрубок 4 и конфузур 10 в полость ротора 7, попадает на отражатель 11. Затем через каналы 8 ротора 7 и каналы 6 статора 5 проходят в камеру озвучивания 9 и выводятся из аппарата через патрубок 2.

Обрабатываемая среда, проходя конфузур, значительно увеличивает скорость истечения и, попадая на отражатель, расположенный на внутренней торцевой поверхности ротора, образует кавитационную полость между выходом конфузур и отражателем.

Кавитационная полость пульсирует с определенной частотой и интенсивностью, определяемыми соотношениями между диаметром сопла и диаметром сопла при определенной форме отражающей поверхности. Наиболее экономически выгодна вогнутая форма отражателя в виде лунки [45].

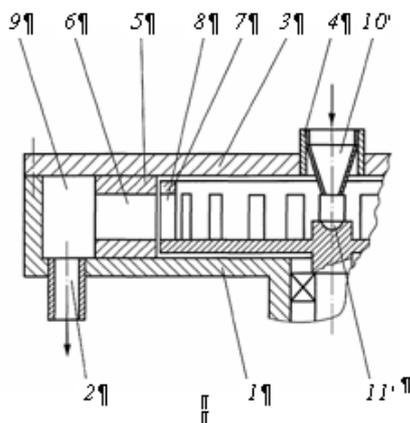


Рис. 3.11. Принципиальная конструкция роторного аппарата по RU 2294236

Таким образом, обрабатываемая среда в полости ротора подвергается дополнительному акустическому воздействию при возникновении интенсивной кавитации. Одновременно в роторном аппарате генерируются акустические колебания, вызываемые периодически перекрывающимися каналами ротора и статора (основной тон). Частота этих колебаний зависит от угловой частоты вращения ротора и числа каналов в роторе и статоре. Если по известным методикам рассчитать диаметры конфузора и лунки, количество каналов в роторе и статоре, определить частоту вращения ротора так, что частота колебаний основного тона будет равна частоте колебания кавитационной полости между конфузуром и отражателем, то возникнет явление резонанса. При этом повышается интенсивность излучения и его монохроматичность. Одновременно возрастает и интенсивность кавитации в полости ротора. Так как направление движения обрабатываемой среды резко изменяется после попадания ее на отражатель, то в полости ротора возникают интенсивные турбулентные потоки. Все указанные факторы позволяют значительно интенсифицировать процессы эмульгирования, диспергирования, растворения, экстракции и т.д. Следует отметить, что при приведении процесса эмульгирования одновременно с уменьшением времени приготовления эмульсии возрастает ее дисперсность, т.е. повышается качество готовой продукции.

К преимуществам предлагаемого конструктивного решения можно отнести то, что его можно использовать практически в любых подобных устройствах, с минимальными затратами на их модернизацию.

Роторный аппарат на входе в который установлена вихревая камера для предварительной обработки потока жидкой среды [53] изображен на рис. 3.12, на котором обозначения те же, что и на рис. 3.11, но позиция 10 – это вихревая цилиндрическая камера с тангенциальным вводом среды 11.

Обрабатываемая среда, подаваемая в цилиндрическую камеру через тангенциально расположенный патрубок, образует вихревой поток. Затем вихревой поток поступает во входной патрубок роторного аппарата меньшего диаметра, при этом интенсивность вихря значительно возрастает и в нем возбуждаются упругие колебания. При срыве потока с кромок входного патрубка также генерируются упругие колебания. Таким образом, в полость ротора излучаются колебания широкого спектра частот. Основная частота колебания зависит от диаметра вихревой камеры, перепада давлений на ее входе и выходе, скорости звука в среде [45]. Одновременно в роторном аппарате генерируются колебания, вызываемые периодическим перекрыванием каналов статора промежутками между каналами ротора (основной тон). Основная частота этих колебаний зависит от угловой частоты вращения ротора, числа каналов в роторе и статоре и определяется по формуле, предложенной М.А. Балабудкиным.

Когда частота колебаний, излучаемых роторным аппаратом, совпадает с основной частотой колебаний, генерируемых вихревой камерой, создаются условия для возникновения резонанса. При этом амплитуды колебаний во всех точках среды удваиваются, а плотность энергии учетверяется [45]. Таким образом, в полости ротора обрабатываемая среда подвергается интенсивному воздействию звуковых колебаний, что приводит к интенсификации химико-технологических процессов, протекающих в системе "жидкость-жидкость".

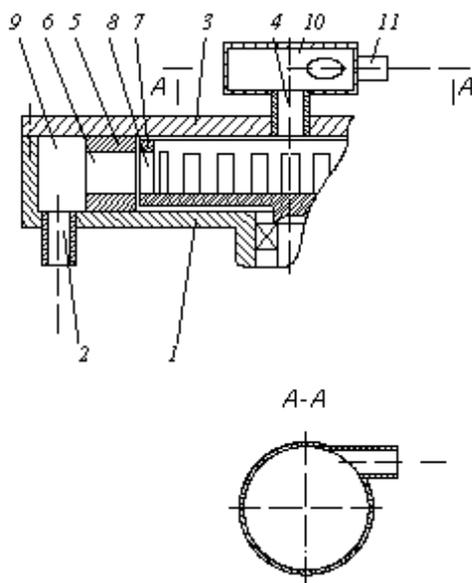


Рис. 3.12. Принципиальная конструкция роторного аппарата по RU 2317141

Отметим преимущество заявляемого устройства по сравнению с прототипом, в котором для достижения резонанса можно изменять только частоту вращения ротора и число каналов в роторе и статоре, так как центробежные и лопастные насосы являются стандартными изделиями и излучают незначительные колебания на строго определенных частотах. Но эти параметры рассчитываются по специальным методикам для достижения наибольшей эффективности роторного аппарата. Достижение резонанса накладывает дополнительные ограничения, что усложняет расчет режимных и конструктивных параметров устройства. Этих недостатков лишено предлагаемое изобретение, так как получение резонанса легко достигается изменением внутреннего диаметра вихревой камеры.

Предлагаемое устройство позволяет также "исправить" ошибки при проектировании и изготовлении роторного аппарата, так как вихревая камера излучает колебания широкого спектра частот, то всегда найдется частота, совпадающая с основным тоном, генерируемым роторным аппаратом.

Пройдя первичную обработку в вихревой камере и полости ротора, жидкая среда затем подвергается дальнейшему воздействию акустических колебаний и кавитации в каналах статора и в камере озвучивания.

Турбулентные пульсации также способствуют интенсификации химико-технологических процессов. При вращении ротора жидкая среда вращается за счет сил трения в том же направлении. Если тангенциальный патрубок 11 расположить таким образом, чтобы направление вращения вихревого движения среды, поступающей через патрубок 4, было противоположно вращению ротора, то турбулизация жидкости в полости ротора возрастет. Это создает благоприятные условия для интенсификации процессов, проводимых в роторных аппаратах.

К важным преимуществам предлагаемого конструктивного решения относится то, что возникновение дополнительных пульсаций среды в полости ротора роторного аппарата не зависит от типа используемого насоса.

Еще одним преимуществом заявляемого устройства является то, что это конструктивное решение можно использовать для модернизации практически всех существующих конструкций роторных аппаратов с минимальными затратами.

Еще одним из способов предварительной обработки среды в полости ротора является прохождение ее через осевой зазор, вполне определенной величины. Продольный разрез такой конструкции роторного аппарата [54] изображен на рис. 3.13. Здесь 9 – осевой зазор, камера озвучивания 10 и 11 – кольцевая камера.

Обрабатываемая среда в осевом зазоре подвергается большим сдвиговым усилиям, что приводит к интенсификации процесса предварительного эмульгирования. Рассматривается задача течения вязкой ньютоновской жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимися дисками. В изобретении это торцы крышки и ротора. Установлено, что при величине относительного зазора $\xi = 14,7$, определяемого по формуле

$$z = \xi(\omega/\nu)^{-1/2},$$

где z – осевой зазор между крышкой 3 и ротором 7, мм; ω – угловая скорость ротора, 1/с; ν – кинематическая вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$, в движущейся жидкости происходит скачкообразное изменение формы эпюры скоростей, при этом происходит и скачкообразное изменение давления. Это приводит к интенсивной турбулизации потока и, как следствие, к интенсификации процесса эмульгирования. Отметим, что проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали высокую критичность процесса скачкообразного изменения формы эпюры скоростей к величине $\xi = 14,7$. Для интенсификации процесса необходимо, чтобы в процессе работы величина относительного зазора проходила через значение 14,7 в сторону увеличения и обратно – в сторону уменьшения. Очевидно, что это достигается при периодическом изменении угловой скорости или осевого зазора. Практически осуществить это достаточно дорого из-за высокой трудоемкости изготовления соответствующих регулирующих устройств. Кроме того, снижается надежность всей конструкции. Однако установлено, что при изготовлении торцевой поверхности ротора реальных размеров величины допусков на торцовое биение, допусков на радиальный посадочный зазор в подшипниках, погрешности сборки в сумме составляют до 10 % от величины осевого зазора, имеющего в реальных аппаратах величину 0,05...0,1 мм. Таким образом при вращении ротора осевой зазор изменяется на величину $\pm 2...5$ % от его среднего значения, что достаточно для осуществления режима работы аппарата, необходимого для интенсификации проводимых химико-технологических процессов. Сделанные выводы подтверждены экспериментально.

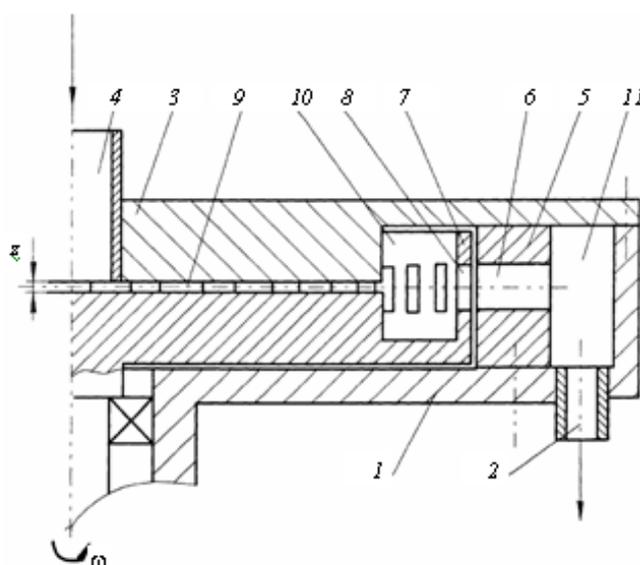


Рис. 3.13. Принципиальная конструкция роторного аппарата по RU 2317142

Отметим, что при выходе из осевого зазора в кольцевую камеру ротора жидкость резко теряет скорость, а при входе в каналы ротора скорость резко возрастает. Это приводит к дополнительной турбулизации потока обрабатываемой среды. В предлагаемой конструкции роторного аппарата осуществляется дополнительная турбулизация среды в кольцевой камере ротора за счет образования вихревой дорожки Кармана. Вихревая дорожка Кармана состоит из правильной последовательности вихрей, вращающихся попеременно вправо и влево. Установлено, что при критерии Рейнольдса больше примерно 1000 критерий Струхала остается почти постоянным, равным 0,21 [55]. Таким образом вихри, срывающиеся с края вращающейся торцевой поверхности ротора в осевом зазоре, значительно интенсифицируют процессы, протекающие в роторном аппарате. Кроме того, в данной конструкции возможно добиться равенства частоты срывающихся вихрей с частотой звуковых колебаний, генерируемых роторным аппаратом в результате перекрывания каналов статора промежутком между каналами ротора. В этом случае возникает резонансный режим работы, при котором значительно возрастает амплитуда звуковых колебаний и интенсивность вихрей, что положительно влияет на скорость химико-технологических процессов. Для того чтобы вихри возникали по всему объему кольцевой камеры, необходимо, чтобы середина осевого зазора находилась на одной оси с осью симметрии каналов ротора и статора.

Роторный аппарат генерирует акустические колебания с основной частотой, определяемой числом каналов в роторе и статоре и угловой скоростью вращения ротора. При совпадении частоты этих колебаний с собственными частотами объемов камеры озвучивания, каналов статора и кольцевой камеры ротора возбуждается стоячая волна, обеспечивающая увеличение скорости гидромеханических тепло- и массообменных процессов в гетерогенных средах. Необходимым условием возникновения стоячих волн в аппарате является равенство ширины кольцевой камеры в роторе длине канала статора и ширине камеры озвучивания.

Таким образом, в предлагаемом устройстве осуществляется комплексное воздействие на обрабатываемую среду: гидромеханическое при предварительной обработке в осевом зазоре; акустическое и гидромеханическое в объемах кольцевой камеры в роторе, каналов статора и камеры озвучивания.

В случае соответствующего расчета геометрических и режимных параметров роторного аппарата в нем возникают условия для различных резонансных процессов, приводящих к интенсификации химико-технологических процессов.

Кроме рассмотренных конструктивных решений запатентованы роторные аппараты с пересекающимися каналами в статоре для турбулизации потока жидкости. Кроме того, в этой конструкции предложенные геометрические соотношения позволяют реализовать резонансный режим работы [56]. Запатентован аппарат с конической рабочей камерой со спиральными выступами на внутреннем конусе и идентичными им спиральными канавками на наружном конусе, причем их шаг уменьшается в сторону вершины конуса [57]. Для создания условий возникновения резонансных явлений предложено согласовать частоту вращения центробежного насоса, являющегося источником дополнительных пульсаций, с основной частотой генерируемым роторным аппаратом [58].

Высокая эффективность роторных аппаратов позволила использовать их для гидроабразивной ультразвуковой обработки деталей имеющих сквозные каналы малого сечения [59], а также для деталей, имеющих отверстия и каналы на периферии детали [60].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ РОТОРНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

4.1. ПОЛУЧЕНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

На основании проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований был запатентован целый ряд конструкций роторного аппарата, описанных в 3 главе. Для приготовления СОЖ на различных предприятиях были спроектированы, изготовлены и смонтированы установки на базе роторных аппаратов. Принципиальная схема, изображенная на рис. 4.1, использована на всех предприятиях с небольшими изменениями применительно к возможностям каждого производства. Например, вместо сжатого воздуха для перемешивания использовались пропеллерные мешалки. В других случаях использовался не сжатый воздух, а пар, что привело к нагреву исходной смеси и улучшило условия для проведения процесса эмульгирования.

Установка работает следующим образом. Эмульсол перекачивается насосом 1 в емкость и перешивается сжатым воздухом. Одновременно дозаторами 3 в бак 4 подается в определенных пропорциях нитрит натрия и кальцинированная сода. В бак 4 подается холодная вода, и полученный раствор предварительно перемешивается сжатым воздухом. Через 2-3 минуты подача сжатого воздуха прекращается перекрытием кранов 5 и 8, эмульсол и раствор ингибитора коррозии через краны 7 и 3 сливается в емкость 9, где смесь перемешивается сжатым воздухом, затем доливается определенный объем воды, необходимой для получения 5 % эмульсии УКРИНОЛа 1. Затем, открыв кран 10, через 3...5 мин, смесь насосом 11 подается в роторный аппарат 12, где происходит интенсивное диспергирование эмульсола. Выходя из аппарата, готовая эмульсия сливается в емкость для СОЖ.

Расход жидкости через роторный аппарат регулируется вентилем 10. Давление в камере озвучивания и перепад давлений между полостью ротора и камерой регулируется вентилями 13 и 14 и контролируется манометрами 15.

Вентили 16, 17 и 18 предназначены для слива из емкостей 2, 4 и 9, соответственно. Указатели 20 и 21 служат для визуального контроля уровня жидкости. В случае применения эмульсола другой марки, обладающего худшими

эмульгирующими свойствами, предусмотрена линия рециркуляции, открываемая вентилем 19. Линия предназначена для многократной обработки эмульсии.

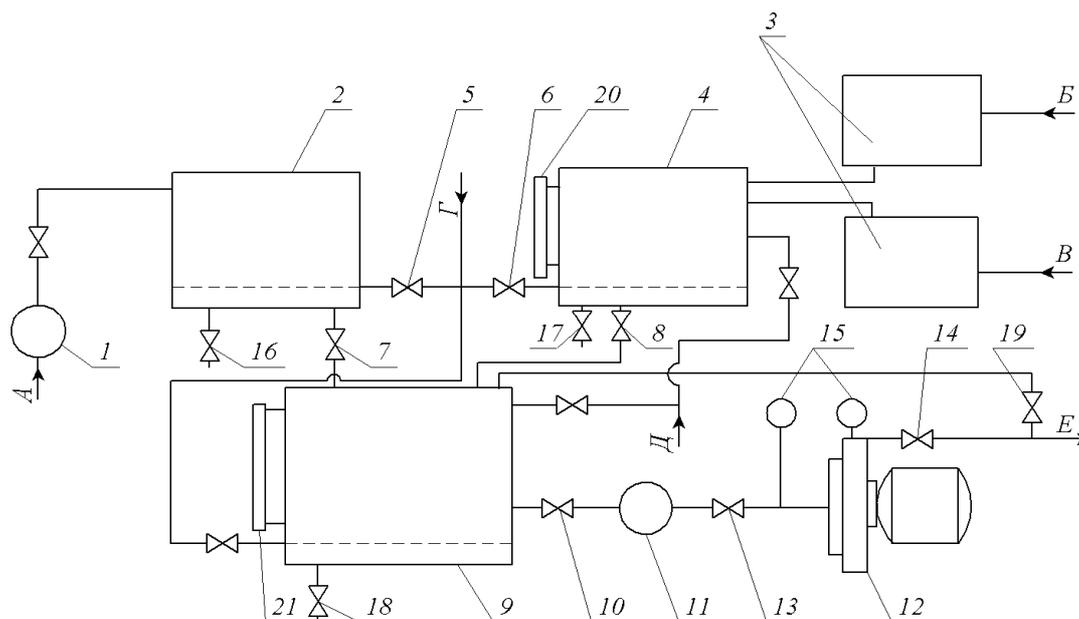


Рис 4.1. Схема промышленной установки для приготовления СОЖ на базе роторного аппарата:

A – эмульсол; *B* – нитрид натрия; *B* – кальцинированная сода;
Г – сжатый воздух; *Д* – холодная вода; *Е* – готовая СОЖ

В результате эксплуатации промышленных установок установлено:

- стойкость режущего инструмента (резцов, сверл, фрез) возросла в среднем на 30 %;
- время расслаивания готовой СОЖ составило минимум 6 суток;
- за время эксплуатации роторный аппарат работал надежно, отказов не зафиксировано;
- выполнение поверхностей ротора и статора коническими позволило по мере их износа устанавливать минимально возможный зазор, без разборки установки; установка на базе роторного аппарата проста в обслуживании и не требует квалифицированного обслуживающего персонала.

В результате использования на заводе ОАО "Тамбовполимермаш" установки для приготовления СОЖ в цехе № 1 в 1984 – 1986 гг. получен реальный экономический эффект 55,87 тыс. р. в год. Роторный аппарат, примененный в этой установке, защищен а. с. СССР № 1187858 "Роторный аппарат".

На ОАО «Мичуринский завод "Прогресс"» на базе роторного аппарата создан участок для централизованной раздачи СОЖ к металлорежущим станкам. В результате кроме экономического эффекта получен и социальный эффект – улучшились условия труда и снизился ручной труд.

Внедренный роторный аппарат защищен а. с. СССР № 1389830 "Роторный аппарат". Реальный экономический эффект от внедрения установки в 1988 – 1993 гг. составил 68,92 тыс. р. в год.

Роторный аппарат, являющийся основной частью установки для получения СОЖ, конструкция которого защищена патентами РФ №№ 2225250, 2230616 "Роторный аппарат" внедрена на ОАО "Патроны" г. Борисоглебск и ОАО "Грибановский машиностроительный завод" п. г. т. Грибановский.

На ОАО «РЖД Локомотивное ДЕПО» г. Тамбова внедрен роторный аппарат, защищенный патентом РФ № 2287360 "Роторный аппарат".

4.2. ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ КРАСКИ

Роторные аппараты с высокой эффективностью применяются в лакокрасочной промышленности. Основная трудность при приготовлении красок – это получение суспензий высокой дисперсности.

На ОАО "Котовский лакокрасочный завод" были проведены эксперименты по получению эмали ПФ 115 белой, которой производится в год до 3000 т. Основная трудность при производстве эмали – тонкое диспергирование двуокиси титана (марка Р-02), имеющей начальный среднеарифметический диаметр 14...15 мкм. На конечной стадии диспергирования на заводе использовались шаровые мельницы.

В качестве замены шаровых мельниц было предложено использовать роторный аппарат особой конструкции, содержащий мелющие элементы высокой поверхностной твердости. В линию были последовательно установлены три роторных аппарата для мокрого диспергирования двуокиси титана. В результате проведенных испытаний полученная суспензия двуокиси титана соответствовала предъявляемым требованиям. Использование роторных аппаратов привело к снижению времени приготовления продукта и затрат электроэнергии.

Экономический эффект от внедрения роторного аппарата составил 409,8 на 1 т эмали ПФ-115 белой. При производстве в 2003 г. 2900 т общий эффект составил более 1,1 млн. р.

4.3. ПОЛУЧЕНИЕ СУХИХ КОНЦЕНТРАТОВ НАТУРАЛЬНЫХ НАПИТКОВ

На научно-производственной фирме "Лионик" г. Москва были проведены в 2005 г. промышленные испытания многоцелевой опытно-промышленной установки на базе роторного аппарата, спроектированного на основании данного исследования, для производства сухих концентратов натуральных напитков специального назначения на стадии приготовления многокомпонентных жидкостных систем (полупродуктов), предназначенных для смешивания с дисперсными ингредиентами, их пропитки, агломерации и сушки полученного продукта.

Часть схемы, в которую включен интересующий нас роторный аппарат, изображена на рис. 4.2.

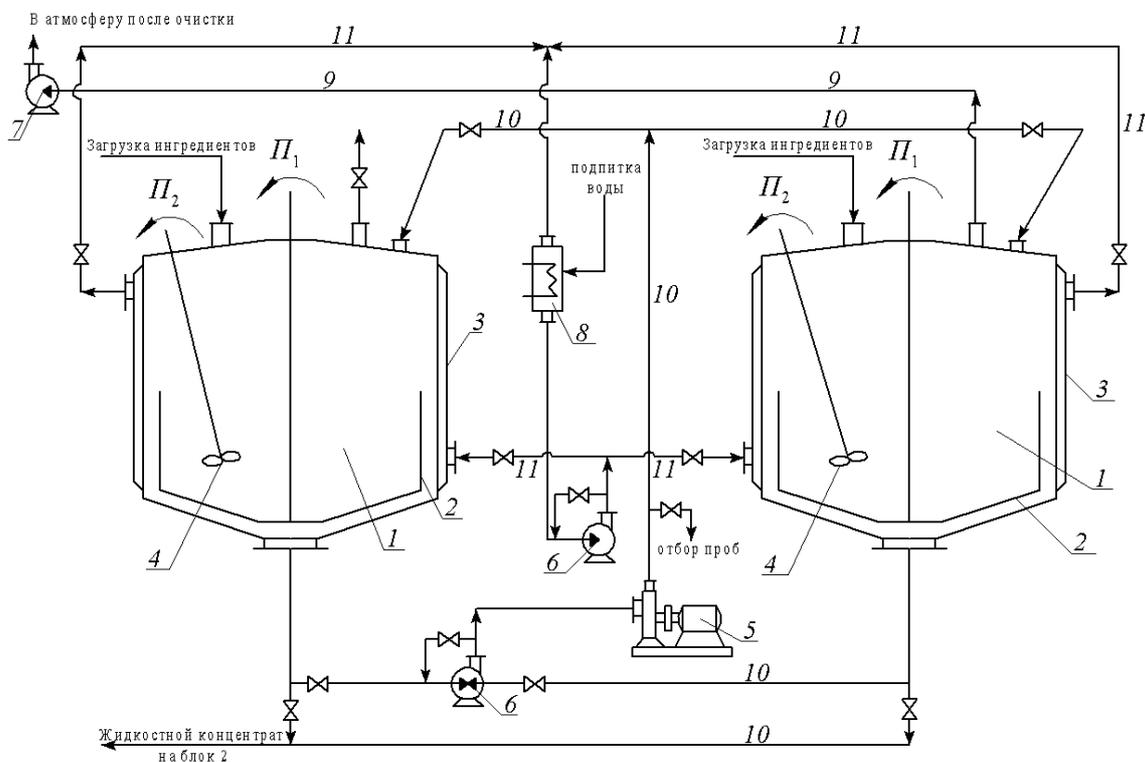


Рис. 4.2. Схема приготовления концентрированной жидкостной части базовой композиции с гомогенизацией

В емкостные аппараты 1, оснащенные рубашками 3 для подачи теплоносителя или хладагента и тихоходными 2 и быстроходными 4 перемешивающими устройствами подается экстракт-концентрат СВ $\approx 70\%$ жидких полупродуктов, желатиновая и крахмальная композиция. В емкостях происходит предварительное перемешивание. Затем с помощью центробежного насоса 6 суспензия под давлением по линии 10 подается в роторный аппарат 5, а затем по циркуляционной линии 10 в емкости 1. Емкости 1 находятся под разрежением, которое обеспечивается вакуумным насосом 7 со степенью разрежения 0,85...0,95. Для подогрева теплоносителя циркулирующего по линии 11 к рубашкам 3 служит электронагреватель 8, в который, по необходимости, производится подпитка водой.

После предварительного смешивания за счет циркуляции между аппаратами 1 жидкая среда проходит через роторный аппарат 5, где происходит окончательная обработка за счет интенсивного кавитационного, турбулентного, акустического и механического воздействия.

Подробная технологическая схема получения концентратов изображена на рис. 4.3.

Приготовление желатиновой и крахмальной композиции осуществляется аналогичным способом, т.е. с использованием роторного аппарата, за исключением того, что процесс протекает под атмосферным давлением и емкость для смешивания одна для каждой композиции.

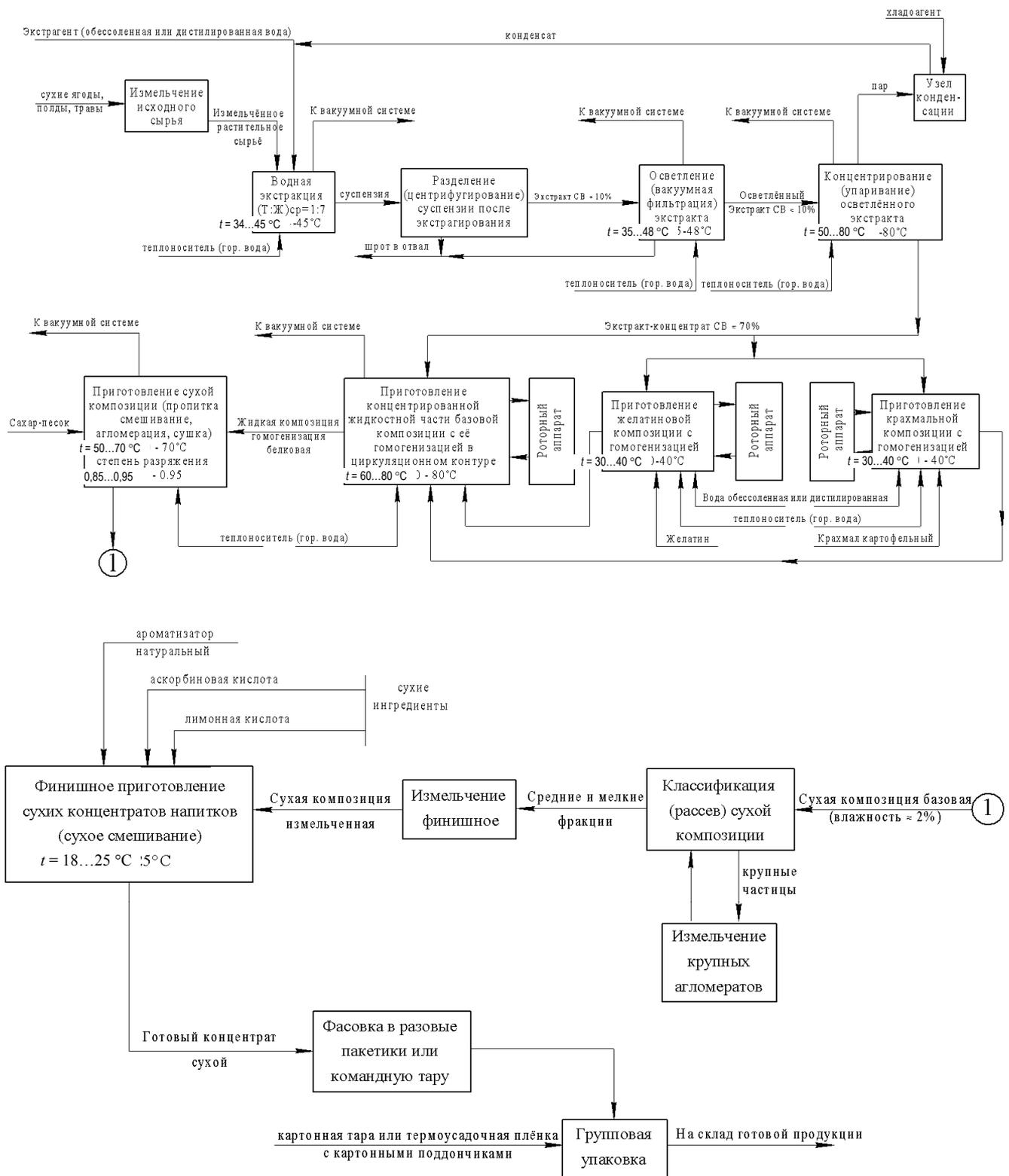


Рис. 4.3. Аппаратурно-технологическая блок-схема безотходного промышленного производства периодического действия сухих концентратов напитков спецназначения для Министерства обороны и Спорткомитета России мощностью 500 кг/смену

Таким образом, основной особенностью рассмотренной схемы является то, что были с успехом отработаны режимы функционирования аппаратуры при проведении совмещенных процессов "смешивание-диспергирование-гомогенизация" многокомпонентных жидкостных систем с получением заранее заданных физико-химических параметров по однородности, дисперсному составу ингредиентов, стойкости на расслаивание и т.п., позволяющими проводить следующие стадии производства сухих концентратов с наибольшей производительностью, а также с высоким качеством конечного продукта.

Внедрение роторного аппарата позволило в два раза увеличить производство сухих концентратов натуральных напитков с улучшением их качества.

Экономический эффект от промышленного внедрения роторного аппарата за период 2005–2006 гг. превысил 16 млн. р.

4.4. ПРОЦЕСС РАСТВОРЕНИЯ СЕРЫ В СМЕСИ МАСЕЛ

Исследована кинетика растворения серы в смеси растительного и минерального масел в роторном аппарате в зависимости от типа кавитации [62].

Для улучшения смазочной способности смеси минерального и растительного масел в нее вводят активирующие присадки. Активированные масла применяют на особо ответственных операциях обработки металлов резанием (шевингование, зубонарезание и т.д.), где необходимо обеспечить высокую стойкость режущего инструмента и высокую чистоту обработанной поверхности.

К процессам активирования смазочных масел относится и процесс осернения элементарной серой. Активирующей присадкой является сера α (ромбическая) и β (моноклинная) модификаций.

Осерненные масла применяются в качестве смазочно-охлаждающей жидкости в часовой промышленности.

По традиционной схеме осерненное масло получают следующим образом. Основу – растительное масло – нагревают в реакторе до 120...130 °С, затем загружают серу, которую расплавляют и растворяют при непрерывном перемешивании. Затем повышают температуру со скоростью 10...30 °С в час до 150...165 °С. Осерненную основу в горячем состоянии смешивают с нагретым до 110 °С веретенным маслом для получения 1,5...2 % серы в готовом продукте в виде раствора. Общая продолжительность процесса 10...12 часов [63]. При такой температуре образуется значительное количество сероводорода, что увеличивает загазованность помещений и ухудшает экономические показатели процесса за счет необратимых потерь серы.

Известна работа, в которой процесс осернения масла проводится в ультразвуковом поле [63]. При соответствующей мощности и частоте колебаний получен высокостабильный продукт при 125...135 °С. В этих пределах температур сероводород не образуется. Эксплуатационные свойства продукта не хуже, чем полученного традиционным способом.

Для приготовления осерненного масла в данной работе использованы модификации роторного аппарата без питающего насоса – проходного и погружного типов. Роторные аппараты работают в докавитационном режиме, при возбуждении импульсных гидродинамической или акустической типов кавитации, смешанном типе кавитации и суперкавитационном режиме. Наиболее эффективным, с точки зрения интенсификации технологических процессов, является режим акустической импульсной кавитации.

Эксперименты проводятся в следующей последовательности. Смесь растительного и минерального масел заливается в бак аппарата, включается привод и затем добавляют серу в количестве 1,5 % от общей массы. Смесь подается в полость ротора, затем через совпадающие отверстия в роторе и статоре выбрасывается в камеру аппарата. Из камеры среда поступает по трубопроводу (в аппарате погружного типа) в бак. Механическое воздействие, турбулентное перемешивание, большие сдвиговые напряжения в зазоре между ротором и статором, интенсивная кавитация способствуют интенсивному диспергированию и растворению серы в масле. При этом происходит диссипация энергии в каналах аппарата, радиальном зазоре, что приводит к нагреванию обрабатываемой среды. Введенная сера полностью растворяется в течение 10...20 мин. При этом смесь нагревается с 10 до 70 °С. Смесь становится прозрачной. В процессе охлаждения небольшое количество серы выпадает в осадок в виде α и β модификаций. Общее количество серы в масле определяется по ГОСТ 1437–75 и составляет $(1,3 \pm 0,2)$ %. Содержание серы в исходном масле колеблется от 0,18 до 0,3 %.

С целью количественной оценки эффективности использования роторного аппарата проведено сравнение с кинетикой растворения серы в аппарате с мешалкой с линейной скоростью вращения внешней поверхности ротора 20 м/с. Сосуд с мешалкой подогревается внешним источником тепла. Роторные аппараты и мешалка термостатируются змеевиком с охлаждающей водой.

Полученные кинетические кривые приведены на рис. 4.4.

Используя уравнение Щукарева, получаем выражение

$$\frac{1}{C_s - C_x} \frac{\partial C}{\partial t} = K \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (4.1)$$

где C_s , C_x – объемные концентрации насыщения и текущая, кг/м³; $\sum_{i=1}^n F_i$ – суммарная поверхность n частиц серы, м²; $\sum_{i=1}^n V_i$ – суммарный объем n частиц серы, определяются из гистограммы фракционного состава; K – коэффициент скорости растворения, м²/с.

В пределах ошибки измерения при концентрациях, близких к насыщению, величина в правой части постоянна, хотя есть тенденция к увеличению. Это можно объяснить изменением дисперсности вследствие диспергирования и растворения.

Коэффициент скорости растворения можно определить в результате интегрирования уравнения (4.1). Кроме того, он может определяться по наклону кривых в начале координат (рис. 4.1), когда фракционный состав серы можно принять одинаковым для всех кривых. Определены соотношения коэффициентов скорости растворения

$$K_1 : K_2 : K_3 : K_4 : K_5 = 0,3 : 1 : 1,8 : 1,9 : 7,6, \quad (4.2)$$

где индексы 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют номеру кривой на рисунке.

$$\ln(C_s - C_x)$$

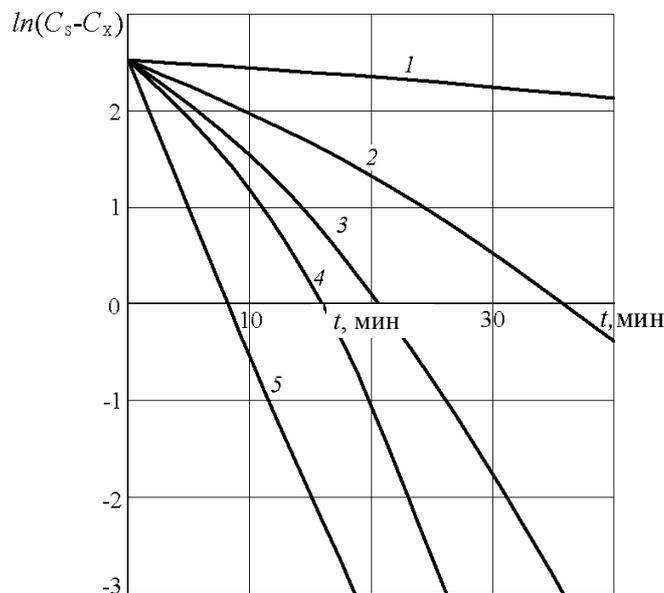


Рис. 4.4. Кинетика растворения серы при температуре, °С:

1 – 40; 2 – 5 – 60; 2 – в реакторе с мешалкой;
 1, 3, 4, 5 – в роторном аппарате; 1 и 3 погружного типа, $P_k = 0,1$ МПа;
 4, 5 – проходного типа при P_k : 5 – 0,15 МПа; 4 – 0,5 МПа

Коэффициент K_5 усреднен на интервале времени 20 мин., т.е. до полного растворения серы. За единицу принят коэффициент скорости растворения в реакторе с мешалкой. Очевидно, что наибольшая скорость растворения наблюдается в роторном аппарате проходного типа при давлении в камере $P_k = 0,15$ МПа (кривая 5). Минимальный коэффициент скорости растворения наблюдается при $P_k = 0,1$ МПа в аппарате погружного типа (кривая 3), кривая 4 является средней между предыдущими случаями. На основании современных представлений о режимах работы роторного аппарата и определяющих эти режимы критериев [65] следует, что кривая 5 соответствует режиму акустической импульсной кавитации, кривая 4 – режиму гидродинамической кавитации. Таким образом, из самых общих представлений теории растворения [30] следует, что в режиме акустической кавитации реализуется наиболее благоприятная гидродинамическая обстановка, приводящая к уменьшению толщины диффузионного слоя. На основании проведенного исследования можно сделать вывод, что растворение труднорастворимых веществ необходимо проводить при возбуждении в аппарате акустической кавитации и оптимальных давлениях.

По кинетическим кривым растворения 1 и 3, представленным на рисунке, можно оценить энергию активации или теплоту растворения серы в масле.

По формуле Аррениуса энергия активации определяется как

$$E_{1,3} = R \frac{T_1 T_3}{T_3 - T_1} \ln \frac{t_1}{t_3}, \quad (4.3)$$

где R – универсальная газовая постоянная; $T_1 = 313$ К – температура раствора в первом опыте; $T_3 = 333$ К – температура в растворе в третьем опыте; $t_1 = 40$ мин. – время растворения серы до концентрации 14,2 г/л в первом опыте; $t_3 = 10$ мин. – время растворения серы до концентрации 14,2 г/л в третьем опыте.

В результате получена величина $E_{1,3} = 90,5$ кДж/моль (энергия молекулярной связи S-S соответствует 225 кДж/моль). На основании результатов проведенных экспериментов можно предположить, что процесс растворения серы в смеси минерального и растительного масел лимитируется кинетикой химической реакции перехода молекул серы из твердого состояния в раствор в пограничном диффузионном слое. Косвенным подтверждением этого предположения является полученное значение энергии активации, так как значение энергии активации для процессов, протекающих в диффузионной области, не превышает 30 кДж/моль.

Доказано, что режим работы роторного аппарата, когда в нем возбуждается акустическая импульсная кавитация, является оптимальным. При этом снижается температура процесса растворения с 160 до 60 °С и удельные энергозатраты на проведение процесса уменьшаются с 69 до 32 кВт ч/м³.

4.5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОТОРНОГО АППАРАТА ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

Высокая степень турбулизации потока жидкости, интенсивная акустическая импульсная кавитация в рабочей зоне роторного аппарата – каналах статора определило его использование для удаления заусенцев во внутренних пересекающихся каналах малого диаметра.

На ОАО «Мичуринский завод "Прогресс"» изготавливают значительную номенклатуру изделий типа "вал" с внутренними пересекающимися каналами малого диаметра. После мехобработки на линии пересечения каналов образуются заусенцы, что по технологии их применения в конечном изделии недопустимо. Для удаления заусенцев на предприятии использовался ручной труд, а в качестве дорнов использовались стальные тросики.

Была предложена конструкция роторного аппарата осуществляющая способ гидроабразивной обработки внутренних каналов. Способ заключается в том, что детали типа "вал" устанавливаются в отверстия статора, причем ось канала детали

совпадает с осью отверстий в роторе. Каналы в детали играют роль каналов статора. Перекрывающиеся отверстия в детали возбуждают в каналах интенсивную акустическую импульсную кавитацию. Если каналы пересекаются под углом, то в местах пересечения инициируется также гидродинамическая кавитация. Для усиления интенсивности обработки в рабочую жидкость добавляют абразив.

Внедренная конструкция аппарата для гидроабразивной обработки деталей защищена а. с. СССР № 1558654 "Способ гидроабразивной обработки сквозных каналов".

В результате эксплуатации установки в течение 1987 – 1992 гг. получен реальный экономический эффект 38,0 тыс. р. в год (цены до 1990 г.).

На ОАО «Мичуринский завод "Прогресс"» прошли испытания установки на базе роторного аппарата для гидроабразивной обработки цилиндрических деталей, имеющих на периферии отверстия неправильной формы, расположенных на одинаковом расстоянии от центра детали.

Принцип использования аксиального роторного аппарата для гидроабразивной обработки отверстий заключается в том, что деталь закрепляется на оси приводного вала и служит ротором, а в статоре выполняются каналы, поперечное сечение которых идентично поперечному сечению обрабатываемых отверстий. Рабочая жидкость с добавлением абразива подается со стороны статора. В обрабатываемых отверстиях инициируется интенсивная акустическая импульсная кавитация. Сильная турбулизация потока в отверстиях приводит к возникновению векторов скорости различного направления у частиц абразива; кроме того, к таким же результатам приводит воздействие на частицы центробежных и кориолисовых сил. Таким образом, абразивные частицы интенсивно обрабатывают внутреннюю поверхность отверстий. Этот способ особенно эффективен при обработке деталей с большим количеством отверстий.

На ОАО «Мичуринском заводе "Прогресс"» проведены испытания установки по удалению клея с поверхности каналов, выделяющегося при склеивании пакета магнитопровода. На заводе эта операция проводилась вручную.

В результате испытаний установлено, что способ обработки повышает производительность труда на 20...30 %, исключается ручной труд и улучшаются условия работы.

Роторный аппарат защищен а. с. СССР № 1722802 "Способ гидроабразивной обработки сквозных каналов".

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения эффективности аппаратов химической технологии необходимо вводить большие плотности энергии и мощности в обрабатываемый объем. Поэтому аппараты должны создавать такую гидродинамическую обстановку в обрабатываемой среде, чтобы плотность мощности трансформировалась от средней безградиентной к огромным импульсным плотностям мощностям.

В квантовой электронике этот принцип осуществляется в мазерах, лазерах и глазерах (квантовые генераторы электромагнитного излучения), где небольшая постоянная плотность мощности «ламп» накаливания трансформируется в «оптической» активной среде в короткие импульсы электромагнитного излучения сверхбольших плотностей мощности.

В гидродинамике такими свойствами обладают кавитационные импульсы давления с амплитудой нескольких гигапаскалей и длительностью порядка нескольких микросекунд. Такая гидродинамическая обстановка в обрабатываемом объеме увеличивает скорость процесса переноса на несколько порядков.

Таким образом, качество технологического процесса зависит не столько от плотности энергии: можно создавать сверхдавление в статическом аппарате, но скорость извлечения при этом увеличится неадекватно введенной в обрабатываемый объем энергии. Необходимо вводить качественно другую плотность мощности, когда градиент энергии будет играть решающую роль для проведения процесса переработки сырья. Плотность мощности в обрабатываемом объеме – новая характеристика гидродинамической обстановки при обработке жидких сред.

До сих пор известно лишь небольшое количество исследований в области технологии получения готового продукта в роторных аппаратах с одновременным диспергированием сырья, когда постоянно обновляется площадь поверхности раздела дисперсной фазы и дисперсной среды. Эффективность любых аппаратов, в том числе и аппаратов с одновременным измельчением сырья, определяется их гидродинамикой.

В заключение следует отметить, что анализ отечественного и зарубежного опыта, накапливаемого в теории и практике роторных аппаратов, указывает на все более возрастающее значение использования этих эффективных и перспективных аппаратов, а также энерго- и материалосберегающих и экологически чистых технологий, основанных на их применении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Червяков, В.М. Гидравлические и кавитационные явления в роторных аппаратах : монография / В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 128 с.
2. Червяков, В.М. Растворение твердого в жидкости и диспергирование жидкостей в роторном аппарате с модуляцией потока : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / В.М. Червяков. – М., 1982. – 165 с.
3. Червяков, В.М. Теоретические основы методов расчета роторных аппаратов с учетом нестационарных гидродинамических течений : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / В.М. Червяков. – Тамбов, 2007. – 438 с.
4. Харкевич, А.А. Линейные и нелинейные системы / А.А. Харкевич. – М. : Наука, 1973. – Т. 2. – 566 с.
5. Красильников, В.А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах / В.А. Красильников. – М. : Физматиз, 1960. – 560 с.
6. Зарембо, Л.К. Введение в нелинейную акустику / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. – М. : Наука, 1966. – 520 с.
7. Балабышко, А.М. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности / А.М. Балабышко, В.Ф. Юдаев. – М. : Недра, 1992. – 176 с.
8. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М. : Иностран. лит., 1956. – 726 с.
9. Юдаев, В.Ф. К вопросу о движении частицы в акустическом поле стоячих волн / В.Ф. Юдаев, Д.Т. Кокорев // Инженерно-физический журнал. – 1968. – Т. 14, № 1. – С. 162 – 164.
10. Angerer, O.A. Ultrashallireaction an pramitiv gebouten Tieren bei microskopischer Unters'uchung / O.A. Angerer, G. Barth, G. Bruns // Arzti Forsch. – 1951. – № 5. – P. 118 – 123.
11. Зимин, А.И. Прикладная механика прерывистых течений / А.И. Зимин. – М. : Фолиант, 1997. – 308 с.
12. Балабышко, А.М. Гидромеханическое диспергирование / А.М. Балабышко, А.И. Зимин, В.П. Ружицкий. – М. : Наука, 1998. – 331 с.
13. Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика : монография / М.А. Промтов. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 260 с.
14. Олейник, О.С. Практикум по автоматизированному электроприводу / О.С. Олейник. – М. : Колос, 1978. – 224 с.
15. Юдаев, В.Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока и импульсным возбуждением кавитации для интенсификации процессов химической технологии : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / Василий Федорович Юдаев. – М., 1984. – 454 с.
16. Макаров, Л.О. Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии / Л.О. Макаров. – М. : Машиностроение, 1983. – 56 с.
17. Юдаев, В.Ф. Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды / В.Ф. Юдаев // Теоретические основы химической технологии. – 1994. – Т. 28, № 6. – С. 581 – 590.
18. Юдаев, В.Ф. Критерий границы между процессами кавитации и кипения / В.Ф. Юдаев // Теоретические основы химической технологии. – 2002. – Т. 36, № 6. – С. 599 – 603.
19. Tilles, J.P. Review of cavitation research on valves / J.P. Tilles, B.W. Marcher // J. of Hydraulic Division. – 1968. – Vol. 94, N 1. – P. 1 – 6.
20. Stiles, G.F. Cavitation in control valves / G.F. Stiles // Instruments and Control Systems. – 1961. – N 11. – P. 2087 – 2097.
21. Петровский, В.С. Гидродинамические проблемы турбулентного шума / В.С. Петровский. – Л. : Судостроение, 1968. – 201 с.
22. Пешкин, М.А. Кавитационные характеристики местных сопротивлений трубопроводов / М.А. Пешкин // Теплоэнергетика. – 1960. – № 12. – С. 59 – 62.
23. Назаров, Г.С. К расчету параметров кавитационного течения в гидравлических системах / Г.С. Назаров // Инженерно-физический журнал. – 1969. – Т. 17, № 3. – С. 397 – 406.
24. Исследование влияния геометрии насадок на гидравлическое сопротивление и акустические характеристики кавитационного течения / Э.С. Арзуманов [и др.] // Труды НИИ автоматика : сб. науч. тр. / НИИ автоматика. – М., 1974. – № 53. – С. 150 – 160.

25. Башков, В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. – М. : Машиностроение, 1985. – 136 с.
26. Клушин, М.И. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием / М.И. Клушин, В.М. Тихонов, Д.И. Симкин. – М. : Машиностроение, 1979. – 192 с.
27. Карташов, А.И. Шероховатости поверхности и методы ее измерения / А.И. Карташов. – М. : Изд-во стандартов, 1964. – 164 с.
28. Богданов, В.В. Эффективные малообъемные смесители / В.В. Богданов, Е.И. Христофорв, Б.А. Клоцунг. – Л. : Химия, 1989. – 224 с.
29. Здановский, А.Б. Кинетика растворения природных солей в условиях вынужденной конвекции / А.Б. Здановский. – Л. : Госхимиздат, 1956. – 220 с.
30. Аксельруд, Г.А. Растворение твердых веществ / Г.А. Аксельруд, А.Д. Молчанов. – М. : Химия, 1977. – 272 с.
31. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М. : Химия, 1980. – 248 с. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / В.Г. Айнштейн [и др.]. – М. : Логос, 2003. – Т. 1. – 912 с.
32. Баранов, Д.А. Процессы и аппараты / Д.А. Баранов. – М. : Академия, 2004. – 304 с.
33. Процессы и аппараты химической технологии: Явления переноса, макрокинетики, подобие, моделирование, проектирование. Т. 1 : Основы теории процессов химической технологии / Д.А. Баранов [и др.] ; под ред. А.М. Кутепова. – М. : Логос, 2000. – 480 с.
34. Мандрыка, Е.А. Экспериментальное исследование кинетики процесса растворения в роторном аппарате с модуляцией потока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Е.А. Мандрыка. – М., 1979. – 16 с.
35. Акулов, Н.И. Стабильность смеси бензина с водоспиртовым раствором / Н.И. Акулов, Ю.Ф. Юдаев // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2005. – № 1. – С. 34.
36. Барам, А.А. Расчет мощности аппаратов роторно-пульсационного типа / А.А. Барам, П.П. Дерка, Б.А. Клоцунг // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1978. – № 4. – С. 5–6.
37. Червяков, В.М. Течение ньютоновской жидкости в зазоре между коническими проницаемыми поверхностями / В.М. Червяков, А.А. Коптев // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79, № 2. – С. 92 – 98.
38. Червяков, В.М. Определение энергозатрат в роторных аппаратах / В.М. Червяков, А.А. Коптев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 4. – С. 10 – 12.
39. Худобин, Л.В. Техника применения смазочно-охлаждающих жидкостей / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский. – М. : Машиностроение, 1964. – 189 с.
40. А. с. 1187858 SU B01F 7/28. Роторный аппарат / В.В. Белик, В.А. Колдин, М.М. Свиридов, В.М. Червяков, Е.С. Шитиков ; Тамб. ин-т. хим. машиностр. – № 3685908/23-26 ; заявл. 15.11.83 ; опубл. 30.10.85, Бюл. № 40.
41. Пат. 2287360 RU B01F 7/00. Устройство для физико-химической обработки жидкой среды / В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев, В.И. Биглер, В. Чичева-Филатова, В.А. Алексеев, Н.И. Акулов ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2004133696/15 ; заявл. 18.11.2004 ; опубл. 27.04.2006, Бюл. № 32.
42. А. с. 1674942 SU B01F 7/28. Роторный аппарат / В.М. Червяков, М.А. Промтов, Ю.В. Воробьев, А.Г. Ткачев ; Тамб. ин-т. хим. машиностроения. – № 4440434/26 ; заявл. 03.06.88 ; опубл. 07.09.91, Бюл. № 33.
43. Пат. 2165292 RU B01F 7/00. Роторный аппарат / В.М. Червяков, М.А. Промтов, А.А. Коптев ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 99119141/12 ; заявл. 06.09.1999 ; опубл. 20.04.2001, Бюл. № 11.
44. Ультразвук : мален. энцикл. / гл. ред. И.П. Галямина. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
45. А. с. 1719045 SU B01F 7/28. Роторный аппарат / В.М. Червяков, Е.С. Шитиков, Ю.В. Воробьев, М.А. Промтов, В.А. Колдин ; Тамб. ин-т. хим. машиностр. – № 4770235/26 ; заявл. 18.12.89 ; опубл. 15.03.92, Бюл. № 10.
46. А. с. 1389830 SU B01F 7/28. Роторный аппарат / В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев, В.И. Токарев, А.Г. Ткачев, В.И. Жеребятьев ; Тамб. ин-т. хим. машиностр. – № 4073350/31-26 ; заявл. 02.06.86 ; опубл. 23.04.88, Бюл. № 15.
47. Пат. 2150318 RU B01F 7/00. Роторный аппарат / А.А. Коптев, В.М. Червяков, М.А. Промтов ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 98120226/12 ; заявл. 10.11.98 ; опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16.
48. А. с. 1428402 SU B01D 3/30. Роторный аппарат / В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев, Б.С. Спиридонов, А.Г. Ткачев, Э.И. Приходько ; Тамб. ин-т. хим. машиностр. – № 4072175/31-26 ; заявл. 28.05.86 ; опубл. 07.10.88, Бюл. № 37.
49. Пат. 2225250 RU B01F 7/28, 7/00, 3/08. Роторный аппарат / В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев, В.Ф. Юдаев, Е.С. Шитиков ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2002107488/15 ; заявл. 25.03.2002 ; опубл. 10.03.2004, Бюл. № 7.

50. Пат. 2230616 RU B06B 1/20. Роторный аппарат / В.М. Червяков, Е.С. Шитиков, А.А. Коптев, В.И. Галаев ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2002107487/28 ; заявл. 25.03.2002 ; опубл. 20.06.2004, Бюл. № 17.
51. Пат. 2294236 RU B01F 7/26. Роторный аппарат / В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев, А.А. Коптев, В.Ф. Юдаев, Ю.В. Родионов, Л.В. Чичева-Филатова, В.А. Алексеев ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2004133695/15 ; заявл. 18.11.2004 ; опубл. 27.02.2007, Бюл. № 6.
52. Пат. 2317141 RU B01F 7/28. Роторный аппарат / В.М. Червяков, С.А. Нагорнов, А.И. Четырин, Р.В. Фокин ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2006117959/15 ; заявл. 24.05.2006 ; опубл. 20.02.2008, Бюл. № 5.
53. Пат. 2317142 RU B01F 7/28. Роторный аппарат / С.А. Нагорнов, В.М. Червяков, А.А. Коптев, Р.В. Фокин ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2006120108/15 ; заявл. 13.06.2006 ; опубл. 20.02.2008, Бюл. № 5.
54. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1969. – 744 с.
55. Пат. 2155634 RU B01F 7/00. Роторный аппарат / М.А. Промтов, В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев, М.В. Монастырский ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 98116768/12 ; заявл. 08.09.98 ; опубл. 10.09.2000, Бюл. № 25.
56. А. с. 1773469 SU B01F 7/28. Роторный аппарат / М.А. Промтов, В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев, В.И. Тебекин ; Тамб. ин-т. хим. машиностр. – № 4820501/26 ; заявл. 26.04.90 ; опубл. 07.11.92, Бюл. № 41.
57. А. с. 1768269 SU B01F 7/28. Роторный аппарат / М.А. Промтов, В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев ; Тамб. ин-т. хим. машиностр. – № 4786904/26 ; заявл. 30.01.90 ; опубл. 15.10.92, Бюл. № 38.
58. А. с. 1558654 SU B24C 3/06, B24B 1/04. Способ гидроабразивной обработки сквозных каналов / В.М. Червяков, М.А. Промтов, Ю.В. Воробьев, Н.Н. Чернецкий, А.Г. Ткачев, А.В. Суворов ; Тамб. ин-т. хим. машиностр. – № 4366902/25-08 ; заявл. 15.01.88 ; опубл. 23.04.90, Бюл. № 15.
59. А. с. 1722802 SU B24C 3/06. Способ гидроабразивной обработки сквозных каналов / В.М. Червяков, М.А. Промтов, Ю.В. Воробьев, В.Н. Поляков, В.И. Жеребятьев, Н.Н. Чернецкий ; Тамб. ин-т. хим. машиностр. – № 4771218/08 ; заявл. 18.12.89 ; опубл. 30.03.92, Бюл. № 12.
60. Исследование процесса растворения серы в смеси масел в роторном аппарате / В.М. Червяков [и др.] // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2006. – Т. 49, Вып. 4. – С. 95 – 97.
61. Курчик, Н.Н. Смазочные материалы для обработки материалов резанием / Н.Н. Курчик, В.В. Вайншток, Ю.Н. Шехтер. – М. : Химия, 1972. – 312 с.
62. Айзенштейн, П.Г. Получение сульфозфрезола с применением ультразвука / П.Г. Айзенштейн, И.Н. Булатова, А.И. Соболев // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1972. – № 3. – С. 20 – 24.
63. Юдаев, В.Ф. Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды / В.Ф. Юдаев // Теоретические основы химической технологии. – 1994. – Т. 28, № 6. – С. 581 – 590.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ОБОЗНАЧЕНИЯ	4
1. РЕЗОНАНС В РОТОРНЫХ АППАРАТАХ	6
1.1. Возникновение резонанса и стоячих волн в каналах статора и камере озвучивания	6
1.2. Механизм влияния резонанса на гидравлическое сопротивление роторного аппарата	9
1.3. Механизм интенсификации массообменных процессов при возникновении стоячих волн	10
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ, КАВИТАЦИОННЫХ, РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РОТОРНЫХ АППАРАТАХ	12
2.1. Описание полупромышленных установок, аппаратного оформления и методики экспериментального исследования ...	12
2.1.1. Полупромышленные установки для проведения экспериментальных исследований и аппаратное оформление ...	12
2.1.2. Методика исследования гидравлических и мощностных характеристик	15
2.1.3. Методика исследования течения жидкости и резонансных явлений	17
2.1.4. Аппаратура и методика исследования акустической импульсной кавитации	22
2.1.5. Методика проведения эксперимента по растворению природной соли в роторном аппарате	27
2.1.6. Методика и аппаратура исследования процесса эмульгирования	28
2.1.7. Методика и аппаратура исследования влияния дисперсности получаемой СОЖ на стойкость режущего инструмента и качество обработанной поверхности	28
2.2. Исследование течения среды в модуляторе роторного аппарата	30
2.2.1. Особенности течения среды в модуляторе роторного аппарата при различных режимах работы	30
2.2.2. Определение коэффициента местного гидравлического сопротивления	34
2.2.3. Влияние угла наклона канала в статоре на гидравлическое сопротивление аппарата	37
2.2.4. Исследование закономерностей явления резонанса в роторных аппаратах	38
2.2.5. Исследование влияния массовых сил на закономерности течения среды в модуляторе роторного аппарата и оценка адекватности моделей течения несжимаемой и сжимаемой среды	43

2.3. Исследование акустической кавитации	47
2.3.1. Влияние статического давления на интенсивность кавитации	47
2.3.2. Влияние угловой частоты вращения ротора на интенсивность кавитации	52
2.4. Исследование кинетики растворения NaCl	55
2.4.1. Влияние интенсивности кавитации на скорость процесса растворения	56
2.4.2. Влияние явления резонанса на скорость процесса растворения	58
2.4.3. Влияние гранулометрического состава NaCl на скорость процесса растворения	59
2.4.4. Исследование влияния угла наклона отверстий в статоре на скорость растворения	61
2.5. Исследование процесса эмульгирования и влияние полученной смазочно-охлаждающей жидкости на качество обработанной поверхности	62
2.5.1. Краткая характеристика существующих смазочно-охлаждающих жидкостей	62
2.5.2. Приготовление эмульсий в промышленности	63
2.5.3. Влияние кавитации на качество получаемой СОЖ	64
2.5.4. Влияние явления резонанса на качество получаемой СОЖ	66
2.5.5. Влияние получаемой СОЖ на стойкость режущего инструмента и качество обработанной поверхности	66
2.6. Определение мощности, потребляемой роторным аппаратом ...	69
3. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ РОТОРНОГО АППАРАТА, ОСНОВАННЫЕ НА РЕЗУЛЬТАТАХ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	71
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ РОТОРНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	93
4.1. Получение смазочно-охлаждающей жидкости	93
4.2. Получение высокодисперсной краски	95
4.3. Получение сухих концентратов натуральных напитков	96
4.4. Процесс растворения серы в смеси масел	100
4.5. Использование роторного аппарата для гидроабразивной обработки отверстий	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	107