

На правах рукописи



Трачук Антон Владимирович

**Исследование и разработка вихревых аппаратов с
вращающимся многофазным слоем**

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск - 2009

Работа выполнена на кафедре «Технологические процессы и аппараты»
Новосибирского государственного технического университета

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Кувшинов Геннадий Георгиевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Сечин Александр Иванович

кандидат технических наук, доцент Ситников Артур Степанович

Ведущая организация:

Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Защита диссертации состоится «10» февраля 2009 г. в 14 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.08 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно – технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «30» декабря 2008 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций Д 212.269.08

кандидат технических наук, доцент



Петровская Т. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема интенсификации процессов тепломассообмена и химических превращений в двух и трехфазных средах является чрезвычайно актуальной для многих технологий. Способы решения рассматриваемой проблемы могут быть различными, тем не менее, все они основаны на увеличении интенсивности межфазного взаимодействия за счет увеличения поверхности контакта фаз, повышения скорости относительного движения фаз, турбулизации и индуцировании локальных течений у поверхностей раздела фаз.

Одним из способов интенсификации взаимодействия многофазных систем является осуществление контакта фаз в центробежном поле. За счет вращения в многофазном слое возникают значительные центробежные силы, что обеспечивает высокую дисперсность и устойчивость многофазной системы, большие удельные поверхности контакта и относительные скорости фаз.

Поле центробежных сил можно создавать различными способами, например, за счет вращения корпуса аппарата. Обычно в литературе аппараты такого типа называют роторными. Так же центробежное поле можно организовать за счет закрутки потока относительно стенок аппарата. Аппараты такого типа в литературе называют вихревыми. Вихревые аппараты имеют простую и более надежную конструкцию.

Экспериментальному и теоретическому изучению гидродинамики и тепломассообмена вихревых течений посвящено огромное количество работ. Однако из-за большого разнообразия вихревых устройств и направленности многих исследований на изучение процессов в конкретных аппаратах нельзя в настоящее время считать проблему расчета вихревых аппаратов окончательно разрешенной.

В данной диссертационной работе рассматриваются вихревые аппараты, в которых закрутка потока осуществляется через боковую поверхность. Обзор опубликованных работ показал, что основные результаты, полученные по данной проблеме, относятся к исследованию и разработке методов расчета вихревых аппаратов с двухфазными газожидкостными и зернистыми слоями. В настоящее время вихревые аппараты такого класса исследуются в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, в Институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, в Институте криосферы Земли СО РАН, в Томском государственном архитектурно-строительном университете, в Омском государственном техническом университете, в Уральском государственном техническом университете, в Казанском государственном технологическом университете, в Институте технической теплофизики НАН Украины, в Новосибирском государственном техническом университете.

Вместе с тем, как отмечалось выше, актуальной задачей является интенсификация тепломассообмена и в технологических процессах с

участием газа, жидкости и твердой фазы. На решение проблемы применения и создания основ расчета вихревых аппаратов для процессов с участием газа, жидкости и твердой фазы направлена данная работа.

Анализ рассмотренных подходов к обобщению экспериментальных данных позволяет предполагать, что для вихревых аппаратов с многофазным слоем, можно применять предложенные в литературе математические модели и результаты исследований, полученные для обычных многофазных систем в поле тяжести, подставляя в соответствующие уравнения вместо гравитационного ускорения центробежное. Для использования этой гипотезы необходимо знать величину скорости вращения многофазного слоя и распределение скорости по радиусу.

Работа выполнена по плану НИР Новосибирского государственного технического университета.

Цель работы – Разработать вихревые аппараты применительно к процессам химической технологии с участием газа, жидкости и твердой фазы и определить соотношения для расчета перепада давления и скорости вращения многофазного слоя.

Основные задачи работы:

- Экспериментально установить закономерности о влиянии на перепад давления и скорость вращения многофазного слоя геометрии вихревого аппарата, расходов газа и жидкости, физических свойств фаз (плотности, формы и размера твердой фазы).
- Экспериментально установить закономерности теплоотдачи от газожидкостного (трехфазного суспензионного) слоя к торцевой поверхности вихревого аппарата.
- Проанализировать возможность применения известных соотношений и разработать модельные представления для расчета перепад давления и скорости вращения многофазного слоя в вихревых аппаратах.

Научная новизна.

1. Установлено влияние геометрии вихревого аппарата, расходов газа и жидкости, на скорость вращения и перепад давления многофазного слоя, при взаимодействии газа, жидкости и твердой фазы в вихревых аппаратах с трехфазным суспензионным слоем (при объемной концентрации твердых частиц в суспензии до 25% размером менее 300 мкм, плотностью до 7000 кг/м³), с трехфазным зернистым слоем (при использовании частиц размером 3-6мм, плотностью 1100-2500 кг/м³) и с трехфазным структурированным слоем (при использовании объемной насадки из проволоки с удельной поверхностью 53 - 158 м²/м³_{слоя}).

2. Установлено влияние геометрии вихревого аппарата, расхода газа, вязкости жидкости на теплоотдачу газожидкостного (трехфазного суспензионного) слоя к торцевой поверхности и разработано эмпирическое уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи в диапазоне чисел Re=2000-70000 и Pr=7-185.

3. Предложены модели для расчета скорости вращения трехфазного суспензионного слоя, трехфазного зернистого слоя и трехфазного слоя с малообъемной насадкой, учитывающие изменение момента импульса жидкости и газа в результате действия момента трения о поверхности аппарата, которые адекватно описывают экспериментальные данные.

Практическая ценность выполненной работы:

- Разработанная и созданная пилотная установка «Вихревой химический реактор бикарбонизатор» показала высокую эффективность при использовании вихревого аппарата с трехфазным суспензионным слоем, в технологии получения высоко чистого карбоната лития на ОАО «НЗХК», что подтверждено актом о практическом использовании результатов НИР.

- Результаты научно-исследовательской работы внедрены в учебный процесс НГТУ, в учебном курсе «Нетрадиционные перспективные процессы и аппараты химической технологии» для студентов по специальности 240801 «Машины и аппараты химических производств», что подтверждено справкой о практическом использовании результатов НИР.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования о влиянии плотности орошения и закрутки жидкости на скорость вращения газожидкостного слоя и перепад давления газа в вихревых аппаратах с пенно-вихревым слоем.

2. Результаты экспериментального исследования влияния твердых частиц (при объемной концентрации в жидкости до 25% и размером менее 300 мкм) на гидродинамику трехфазного суспензионного слоя, модельные представления для расчета скорости вращения трехфазного суспензионного слоя и перепада давления газа в вихревых аппаратах.

3. Результаты экспериментального исследования теплоотдачи между газожидкостным (трехфазным суспензионным) слоем и торцевой поверхностью, предложенное на их основе эмпирическое уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи.

4. Результаты экспериментального исследования перепада давления и скорости вращения зернистого слоя в вихревых аппаратах, модельные представления для расчета скорости вращения слоя и перепада давления в вихревых аппаратах с трехфазным зернистым слоем.

5. Результаты экспериментального исследования гидродинамики вихревых аппаратов с малообъемной насадкой и полученные уравнения для расчета скорости вращения многофазного слоя и перепада давления газа в вихревом аппарате с малообъемной насадкой.

Апробация работы. Результаты работы докладывались: на конференциях:

- международных: «XXVIII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 12-14 октября 2005); «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Москва, 21-23 октября 2008).

- всероссийских: "Новые химические технологии: производство и применение" (Пенза, 2001); «Наука. Технологии. Инновация.» (Новосибирск 2003, 2004, 2005); «Наука. Промышленность. Оборона» (Новосибирск, 2006).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 11 печатных работах, включая 3 статьи в Центральном Российском издании.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 161 страницу основного текста, 59 рисунков. Список литературы содержит 156 источников, общий объем работы - 191 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, дана структура и общее описание работы.

В главе 1 проанализировано современное состояние рассматриваемой проблемы, изложены особенности аппаратов для процессов с участием газа, жидкости и твердого вещества, рассмотрены способы интенсификации теплообмена и химических превращений в многофазных системах. Рассмотрены особенности конструкций вихревых аппаратов (схема на рис.1), проанализированы известные соотношения и зависимости для расчета гидродинамики вихревых аппаратов с газожидкостным слоем и со слоем, содержащим твердые частицы.

Для расчета скорости вращения зернистого слоя в монографии М.А. Гольдштика¹ рассматривается напряженное состояние слоя частиц:

$$-\varphi_s \cdot \rho_s \cdot \omega^2 \cdot r = \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} + F_r, \quad (1)$$

где $F_r = \frac{3}{4} \cdot \frac{C_{fs}}{d_s} \cdot \frac{(1-\varphi_s) \cdot \varphi_s}{\psi^2} \cdot \rho \cdot V_r^2 - \varphi_s \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r$ - сила, действующая на

частицы в объеме со стороны потока; σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi}$ - нормальные напряжения в зернистой среде. При допущении, что зернистая среда ведет себя как

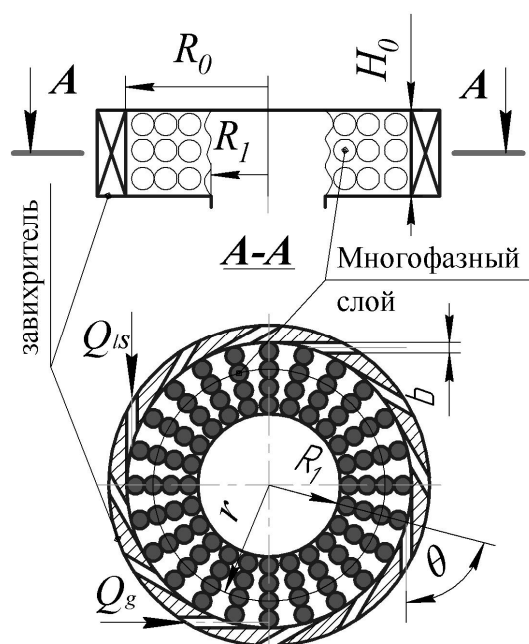


Рис. 1 Схема вихревого аппарата

¹ Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое / Отв. Редактор Н.И. Яворский – Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН - 2005.-358 с.

жидкость, для которой справедлив закон Паскаля, т.е. $\sigma_{rr}=\sigma_{\varphi\varphi}$. и принимая, что напряжение на внешней границе слоя при $r=R_0$ равно нулю $\sigma_{rr}(R_0)=\sigma_{rr}(R_1)=0$, т.е. слой находится в подвешенном состоянии (наступает режим минимального псевдооживления) из уравнения (1) определяется скорость вращения слоя. Для вихревого аппарата с плоскими торцевыми поверхностями при $H_0=const$, изображенного на рис.1, скорость вращения в безразмерном виде равна:

$$V_{sl} = \frac{W_{sl0}}{W_g} = \frac{\omega \cdot R_0}{W_g} = \frac{1}{2 \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \varepsilon}{\psi} \cdot \frac{1}{\xi \cdot (1 + \xi)} \cdot \frac{1}{(\rho_s - 1)} \cdot \frac{1}{d_s}} \quad (2)$$

При вычислении перепада давления потока на слое зернистого материала в монографии М.А. Гольдштика предлагается учитывать силу трения при фильтрации потока через зернистый слой и центробежную силу, возникающую при вращении потока. Безразмерное уравнение для расчета перепада давления в аппарате с учетом сопротивления завихрителя равно:

$$Eu = \frac{\Delta P_{BA}}{\rho_g \cdot W_g^2} = B \cdot \frac{3 \cdot \varphi_s \cdot \rho_{lg}}{8 \cdot \psi \cdot (1 - \varphi_s) \cdot h^2 \cdot d_s \cdot \rho_g} \cdot \left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) + \frac{V_{sl}^2}{2} \cdot \frac{\rho_{lg}}{\rho_g} \cdot (1 - \xi^2) + \frac{A}{4 \cdot z^2 \cdot \sin^2 \theta} \quad (3)$$

Для определения скорости вращения газожидкостного слоя в зависимости от основных параметров в научной литературе предложен целый ряд полуэмпирических соотношений. Большинство соотношений для скорости вращения основано на рассмотрении баланса момента импульса. При записи баланса момента импульса обычно принимается, что скорость вращения пенно-вихревого слоя постоянна по толщине слоя и не зависит от радиуса $W_{sl}=const$. Так изменение момента импульса газовой фазы в вихревом аппарате равно: $M_g = \rho_g \cdot Q_g \cdot (R_0 \cdot V_0 - R_1 \cdot W_{sl})$. Изменение момента импульса жидкости в вихревом аппарате равно: $M_l = \rho_l \cdot Q_l \cdot (R_L \cdot V_L - R_1 \cdot W_{sl})$. Момент импульса газовой фазы и жидкости теряется на преодоление момента сил трения пенно-вихревого слоя с эффективной плотностью $\rho_{lg} = (1 - \varphi_g) \cdot \rho_l + \varphi_g \cdot \rho_g$ о торцевые поверхности вихревого аппарата: $M_{mp.lg} = \int \tau_{lg} \cdot r \cdot dS$, где $\tau_{lg} = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho_{lg} \cdot W_{sl}^2$ - касательное напряжение трения газожидкостного слоя ($C_f=const$; $\varphi_g=const$). Баланс момента импульса для газожидкостного слоя можно записать в следующем виде:

$$M_l + M_g = M_{mp.lg} \quad (4)$$

Отличия в уравнениях разных авторов связаны с разными значениями принятых величин газосодержания пенно-вихревого слоя $\varphi_g=0.5-0.7$, а так же с особенностями учета влияния на скорость вращения слоя момента импульса вносимого жидкостью и учетом влияния трения газожидкостного слоя о боковую поверхность направляющего аппарата.

Как правило, перепад давления в вихревом аппарате с газожидкостным слоем рассчитывается как сумма перепадов давления на завихрителе и на

газожидкостном слое. Для расчета перепада давления в вихревом аппарате в научной литературе имеется обобщающая зависимость, которая в обозначениях данной работы имеет вид:

$$Eu = \frac{\Delta P_{BA}}{\rho_g \cdot W_g^2} = \frac{A}{4 \cdot z^2 \cdot \sin^2 \theta} + B \cdot \frac{(1 - \varphi_g) \cdot \rho_l}{\rho_g} \cdot V_{sl}^2 \cdot \ln\left(\frac{1}{\xi}\right), \quad (5)$$

где коэффициенты A и B эмпирические коэффициенты, зависящие от конструкции завихрителя.

Анализ имеющихся публикаций показал, что в научной литературе имеются сведения по гидродинамике и тепломассообмену двухфазного слоя в вихревых аппаратах. Сведения по исследованию вихревых аппаратов с трехфазным слоем в научной литературе не обнаружены. Для процессов с участием газа, жидкости и твердой фазы в работе рассматриваются вихревые аппараты, в которых реализуется:

- структурированный пенно-вихревой слой, с твердой фазой в виде «активной» торцевой поверхности;
- трехфазный суспензионный слой, с твердой фазой в виде частиц размером менее 300 мкм, при объемной концентрации твердых частиц в суспензии до $\varphi_s=0.25$;
- трехфазный зернистый слой, с частицами размером 3-6 мм.
- структурированный пенно-вихревой слой, с твердой фазой в виде малообъемной насадки, при использовании объемной насадки из проволоки с удельной поверхностью 53 - 158 м²/м³ слоя.

В главе 2 описаны экспериментальная установка, измерительные схемы, аппаратура и методики измерения. Описаны конструкции используемых вихревых аппаратов и конструкция крупномасштабной установки. В экспериментах использовались воздух, вода, водно-глицериновые растворы с массовой концентрацией глицерина от 0 до 60%, применялись водные суспензии с частицами размером 40-300 мкм, материал - цинк, глинозем, кварцевый песок. Так же использовались шарообразные частицы размером 3-6 мм из стекла и пластика, объемная насадка из проволоки с удельной поверхностью 53 м²/м³, 105 м²/м³, 158 м²/м³. Полученные экспериментальные данные по гидродинамике вихревых аппаратов с многофазным слоем обрабатывались в виде безразмерной скорости вращения слоя $V_{sl} = W_{sl0}/W_g$ и критерия Эйлера $Eu = \Delta P_{BA} / \rho_g \cdot W_g^2$.

В главе 3 приведены результаты исследования гидродинамики пенно-вихревого слоя и трехфазного суспензионного слоя в зависимости от геометрии вихревого аппарата, расходов газа и жидкости. На основе известного подхода, но с учетом момента сил трения пенно-вихревого слоя о цилиндрическую поверхность завихрителя, получено более общее соотношение для расчета скорости вращения пенно-вихревого слоя.

Скорость вращения слоя представляли в виде $W_{sl} = W_{sl0} \cdot \left(\frac{r}{R_0}\right)^n = W_{sl0} \cdot \xi^n$, где степень $n=-1$ при потенциальном распределении скорости, $n=1$ при вращении слоя с постоянной угловой скоростью, $n=0$ для случая, когда окружная скорость слоя постоянна и не зависит от радиуса. Уравнение для безразмерной скорости вращения пенно-вихревого слоя получено в виде:

$$V_{sl} = \frac{W_{sl0}}{W_g} = \frac{1 + 2 \cdot \lambda \cdot \xi_L \cdot v_L \cdot z}{2 \cdot z \cdot \left[\frac{\xi^{n+1} \cdot (1 + \lambda)}{2} + \sqrt{\frac{\xi^{2(n+1)} \cdot (1 + \lambda)^2}{4} + \frac{f \cdot (2 \cdot J + \Upsilon) \cdot (1 + 2 \cdot \lambda \cdot \xi_L \cdot v_L \cdot z)}{2 \cdot z}} \right]} \quad (6)$$

где $J = \frac{1 - \xi^{2 \cdot n + 3}}{(3 + 2 \cdot n)}$, $\Upsilon = (1 - s) \cdot h \cdot \frac{1 - \varphi_{gz}}{1 - \varphi_g}$ - безразмерные параметры.

В случае, когда окружная скорость слоя постоянная $n=0$ и выполняется условие оттеснения пенно-вихревого слоя от поверхности завихрителя $\varphi_{gz}=1$ (газосодержание у завихрителя) $\Upsilon=0$, а формула (6) принимает традиционный вид. При наличии взаимодействия вихревого слоя с завихрителем в (6) подставляется соответствующее значение, $\varphi_{gz}=\varphi_g$. В специальных экспериментах по исследованию распределения скорости вращения пенно-вихревого и трехфазного суспензионного слоя по радиусу подтверждено, что скорость вращения слоя может быть принята постоянной по всей толщине, т.е. $n=0$. Из экспериментальных данных следует, что при увеличении толщины пенно-вихревого слоя скорость вращения уменьшается, а перепад давления на вихревом аппарате увеличивается. При уменьшении проходного сечения завихрителя критерий Эйлера и скорость вращения увеличиваются.

При расчете в уравнении (6) принимались значения $C_f=0.025$ и $\varphi_g=0.6$, а в уравнении (5) по измеренному значению скорости вращения слоя находились коэффициенты A и B . Экспериментальные значения безразмерной скорости вращения слоя для аппаратов малого диаметра (100-120 мм) находятся между расчетными значениями по уравнению (6) с условием $\varphi_{gz}=1$ и $\varphi_{gz}=\varphi_g$. Эмпирические коэффициенты в уравнении (5), полученные по измеренному значению скорости вращения слоя для вихревого аппарата с щелевым завихрителем $A=1.2$, $B=0.85$, для лопаточного завихрителя $A=0.7$, $B=0.7$, для крупномасштабного аппарата $A=0.8$ $B=0.7$.

В научной литературе представлены экспериментальные данные по гидродинамике пенно-вихревого слоя при относительно небольших массовых соотношениях расхода газа и жидкости: в пределах 1-2 кг жидкости/кг газа. На рис.2 представлены экспериментальные данные и расчет скорости вращения пенно-вихревого слоя с дополнительной закруткой жидкости. Скорость подачи жидкости в пенно-вихревой слой составляла 2м/с, 4м/с и 7м/с. На рис. 2 показано, что при плотности орошения от 0,5 до 7кг жидкости/кг газа уравнения для расчета скорости вращения пенно-вихревого слоя (6) и перепада давления в вихревом аппарате (5) хорошо описывают экспериментальные данные, при условии оттеснения слоя от

поверхности завихрителя при $\varphi_{gz}=1$. В пилотной крупномасштабной установке с лопаточным завихрителем диаметром 440 мм и с дополнительной закруткой жидкости достигнута плотность орошения до 22 кг жидкости на 1кг подаваемого в аппарат газа, а экспериментальные данные лучше описываются уравнениями с условием оттеснения слоя от поверхности завихрителя при $\varphi_{gz}=1$, $Y=0$.

Таким образом, подавая в аппарат жидкость с закруткой, можно дополнительно регулировать скорость вращения газожидкостного слоя и выдерживать различные необходимые соотношения расходов газа и жидкости.

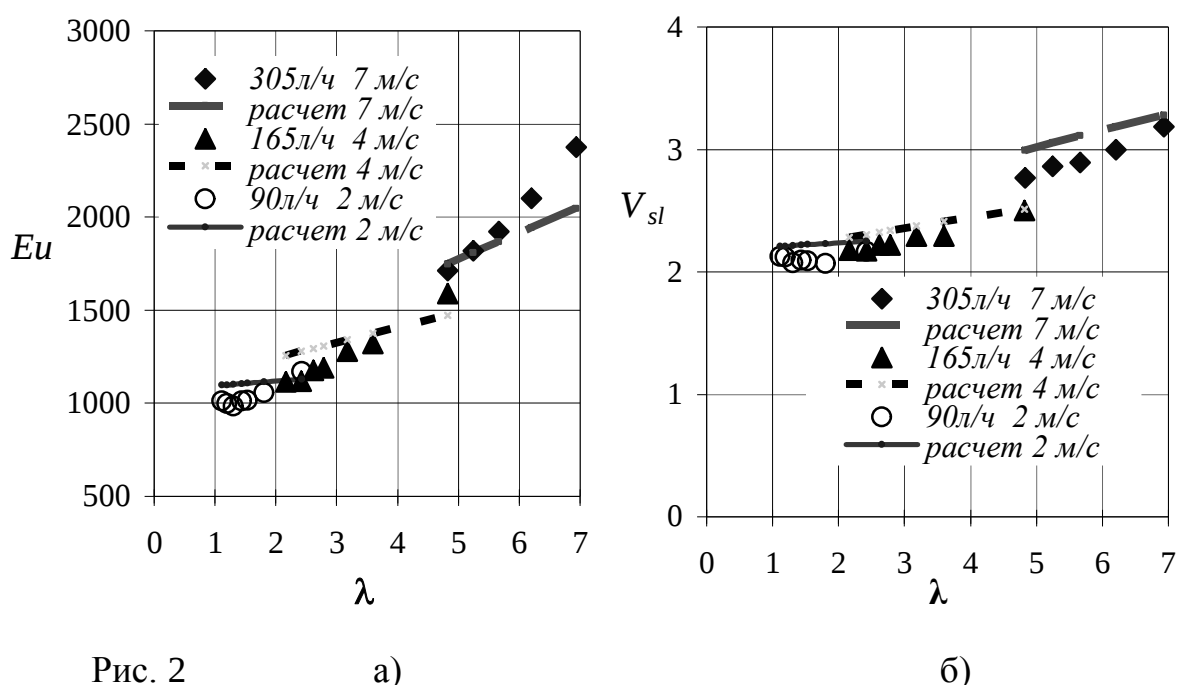


Рис. 2 а) Зависимость критерия Эйлера Eu от плотности орошения λ ;
б) Зависимость безразмерной скорости вращения V_{sl} слоя от плотности орошения λ . Вихревой аппарат с $R_0=50$ мм, $s=5.7\%$, $h=0.3$, $\xi=0.54$.

Для трехфазного суспензионного слоя газ/жидкость/твердое вещество при объемной концентрации твердых частиц в суспензии до $\varphi_s=0.25$ в случае достаточно мелких частиц (до 0,3мм) полагали, что твердая фаза достаточно равномерно распределена в суспензии. Смесь твердых частиц и жидкой фазы можно считать квазигомогенной жидкостью, обладающей эффективной плотностью суспензии, через которую барботируется газ. Для трехфазного суспензионного слоя принималось, что скорость вращения и перепад давления в вихревом аппарате можно рассчитывать по уравнениям для газожидкостного слоя, в которой взаимодействует газ и жидкость, обладающая эффективной плотностью суспензии. На рис.3а приведены экспериментальные и расчетные значения безразмерной скорости вращения

трехфазного суспензионного слоя V_{sl} в зависимости от средневзвешенной плотности суспензии жидкость/твердое $\rho_{ls} = \varphi_s \cdot \rho_s + (1 - \varphi_s) \cdot \rho_l$.

Экспериментальные значения безразмерной скорости вращения суспензионного слоя для аппаратов малого диаметра, так же как и для газожидкостного слоя находятся между расчетными значениями по уравнению (6) с условием $\varphi_{gz}=1$ и $\varphi_{gz}=\varphi_g=0.6$. Значения перепада давления газа для двух- и трехфазного слоя обработаны в виде зависимости экспериментального числа Эйлера Eu от расчетного (рис.3б). Как видно, с точностью не хуже $\pm 20\%$ имеется соответствие расчета и эксперимента.

Таким образом, при объемной концентрации твердых частиц в суспензии до $\varphi_s=0.25$ и размером менее 300 мкм гидродинамика трехфазного суспензионного слоя хорошо описывается уравнениями для газожидкостного слоя, в которых вместо плотности жидкости используется эффективная плотность суспензии.

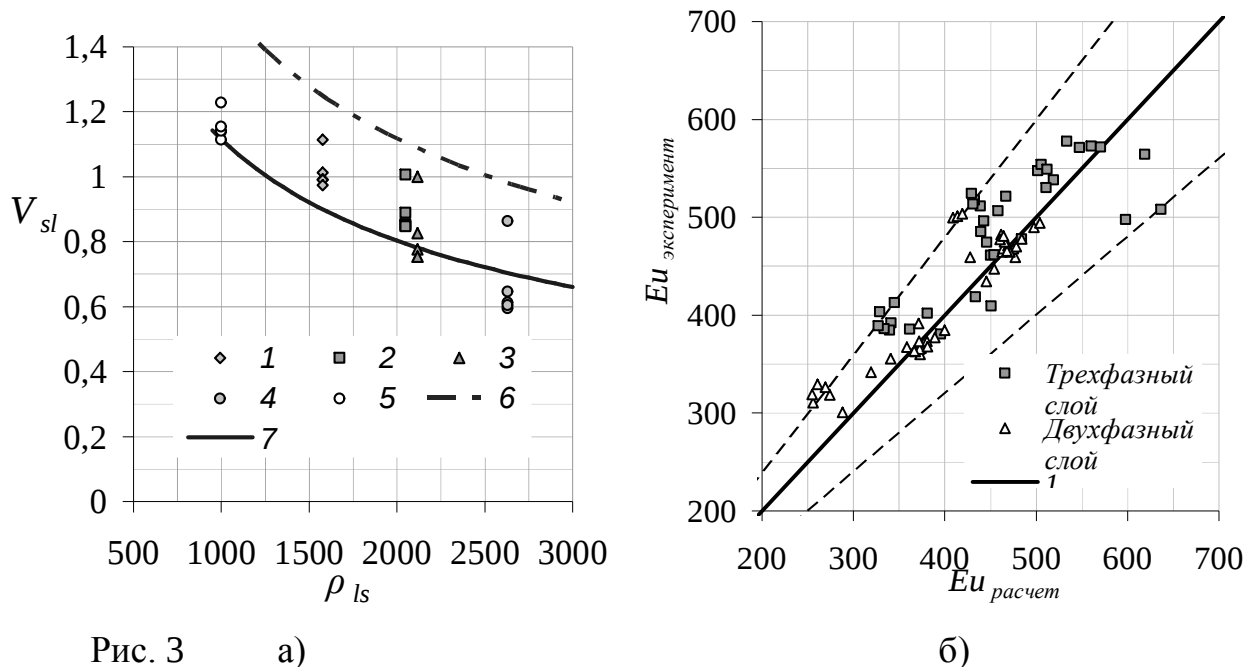


Рис. 3 а) б)
а) Безразмерная скорость вращения слоя V_{sl} в зависимости от плотности суспензии ρ_{ls} . б) Сравнение экспериментальных и расчетных значений критерия Эйлера. 1, 2, 3, 4, - суспензионный трехфазный слой $\rho_{ls}=1580$; 2050; 2120; 2650 кг/м³; 5 - двухфазный слой вода – воздух, 6,7 - расчет скорости вращения при использовании эффективной плотности суспензии с условием с условием $\varphi_{gz}=\varphi_g$ и $\varphi_{gz}=1$ соответственно.

$R_0=50$ мм, $h=0.62$, $s=5.5\%$, $\xi=0.5$, $\lambda=2$.

В главе 4 проведен анализ известных способов организации теплообмена для многофазных систем и соответствующих расчетных зависимостей, приведены результаты исследования процесса теплоотдачи между многофазным слоем и торцевой поверхностью. Экспериментально

установлено, что процесс теплоотдачи между слоем и торцевой поверхностью характеризуется высокими значениями коэффициента теплоотдачи (для воды и водных суспензий $\alpha=10-25$ кВт/м²·К), поэтому торцевые поверхности можно использовать для подвода (отвода) тепла в теплонапряженных процессах. При необходимости в аппарат могут быть введены дополнительные поверхности в виде плоских колец, делящих слой на секции, либо спиральных вставок.

Экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи для газожидкостного и суспензионного слоя хорошо обобщаются в зависимости от скорости вращения слоя. При добавлении в жидкость твердых частиц (размером до 0,3мм и с объемной концентрацией до $\varphi_s=0.25$) коэффициент теплоотдачи уменьшается, вследствие того, что происходит уменьшение

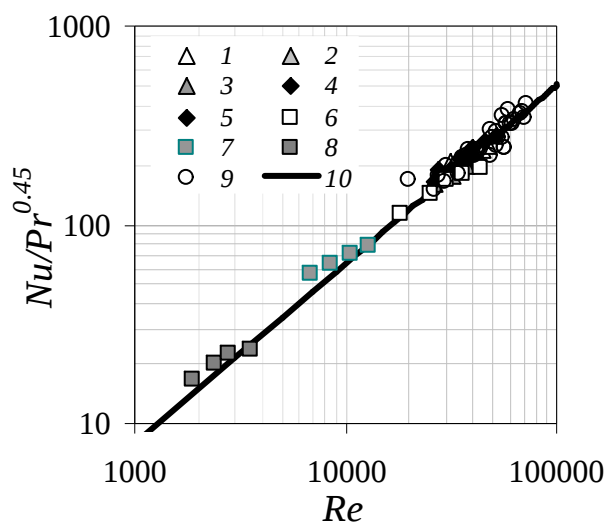


Рис.4 Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче слоя.

1 - суспензия песка 5%; 2 - суспензия песка 10%; 3- суспензия песка 20%; 4 - суспензия цинка 10%; 5 - суспензия глинозема 20%; 6, 7, 8 - растворы вода + глицерин, 9 – вода; 10 – обобщение экспериментальных данных.

скорости вращения слоя. При использовании водоглицериновых растворов коэффициент теплоотдачи уменьшается с увеличением вязкости жидкости, но при этом скорость вращения слоя практически не изменяется. Экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи между торцевой поверхностью и газожидкостным (трехфазным суспензионным) слоем в зависимости от геометрии вихревого аппарата, расходов газа, вязкости жидкости, содержания твердых частиц в суспензии с точностью не хуже $\pm 20\%$, обобщает (рис.4) предложенное эмпирическое уравнение в диапазоне чисел $Re=2000-70000$ и $Pr=7-185$:

$$Nu = 0.016 \cdot Re^{0.9} \cdot Pr^{0.45} \quad (7)$$

где $Nu=\alpha \cdot L/\lambda_l$ - критерий Нуссельта, L - характерный размер теплообменной поверхности, λ_l - коэффициент теплопроводности жидкости, $Re=W_{sl} \cdot L/\nu_l$ - критерий Рейнольдса, ν_l - коэффициент кинематической вязкости жидкости, W_{sl} - скорость вращения слоя, Pr - критерий Прандтля.

Вид уравнения (7) соответствует соотношению для конвективного теплообмена, поэтому, основываясь на тройной аналогии Рейнольдса можно

прогнозировать высокие значения коэффициентов массоотдачи между слоем и торцевой поверхностью.

В главе 5 приведены результаты исследования гидродинамики вращающегося зернистого слоя и трехфазного слоя с объемной насадкой. Установлено, что за счет изменения расходов газа и жидкости, а так же за счет вращения корпуса, в вихревых аппаратах обеспечивается возможность широкого варьирования гидродинамических режимов трехфазного слоя. Из литературных данных известно, что для удержания концентрированного слоя частиц, вращающегося с постоянной угловой скоростью, условие нейтрального равновесия выполняется, если торцевые поверхности соответствуют профилю:

$$H = H_0 \cdot \left[\frac{R_0}{r} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

В опытах подтверждено, что для получения устойчивого, вращающегося зернистого слоя с непроточной твердой фазой необходимо профилировать торцевые поверхности по закону (8). Фотографии трехфазного зернистого слоя в вихревом аппарате с профилированными торцевыми поверхностями показаны на рис. 5 (структура слоя однородная, без «пузырей», $\varphi_s \approx 0.5$).



а) частицы $d_s=3$ мм, $\rho_s=2500$ кг/м³, б) частицы $d_s=5$ мм, $\rho_s=1100$ кг/м³.

Рис. 5 Непроточный по твердым частицам трехфазный вихревой слой

Как следует из рисунка 6, скорость вращения трехфазного слоя возрастает с увеличением расхода газа, она больше, чем скорость вращения двухфазного слоя газ-твердое, но меньше газожидкостного. Гидравлическое сопротивление трехфазного слоя так же больше сопротивления двухфазного слоя газ – твердое и меньше газожидкостного. Снижение размера частиц приводит к увеличению скорости вращения слоя и перепада давления. С увеличением плотности твердых частиц скорость вращения уменьшается.

Увеличение скорости вращения трехфазного слоя может быть обеспечено за счет дополнительной подачи жидкости в вихревой аппарат. Показано, как это следует из рисунка 7, что с увеличением расхода жидкости скорость трехфазного зернистого слоя и перепад давления увеличиваются.

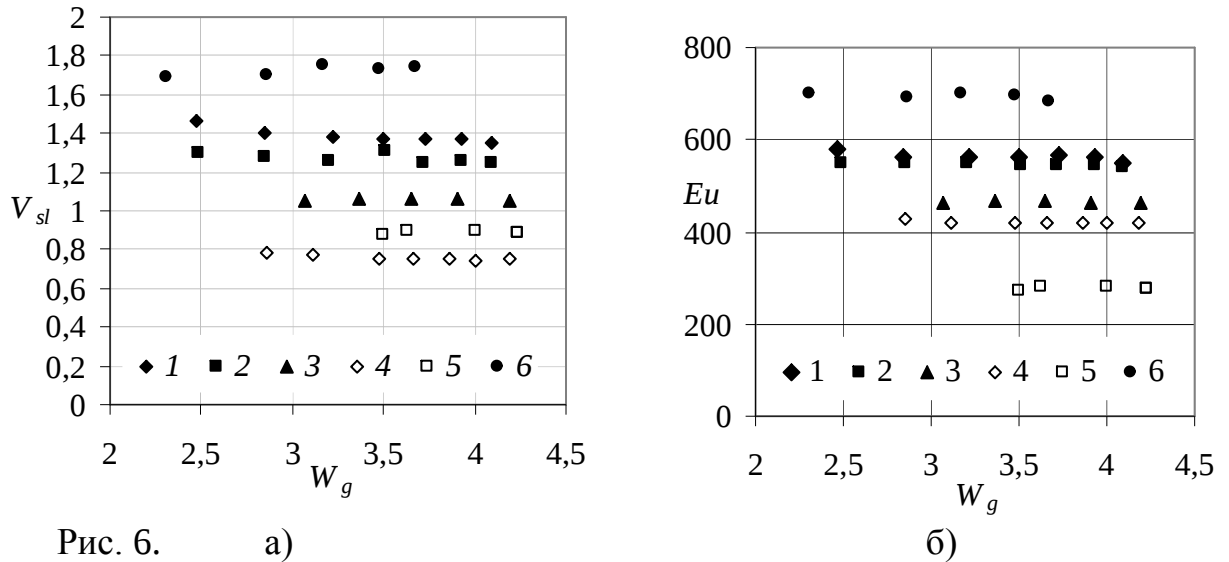


Рис. 6. а) Значения безразмерной скорости вращения слоя от скорости газа; б) Значения Критерий Эйлера от скорости газа. 1, 2, 3 - трехфазный слой $Q_l=90$ л/ч, частицы $\rho_s=1100$ кг/м³, $d_s=3$ мм, 4 мм, 5 мм; 4 - трехфазный слой $Q_l=90$ л/ч, частицы $\rho_s=2500$ кг/м³, $d_s=3$ мм; 5 - слой газ-твердая фаза $d_s=4$ мм, $\rho_s=1100$ кг/м³; 6-газожидкостный слой. $R_0=50$ мм, $h=0.3$, $\xi=0.7$, $Q_g=70-120$ м³/ч.

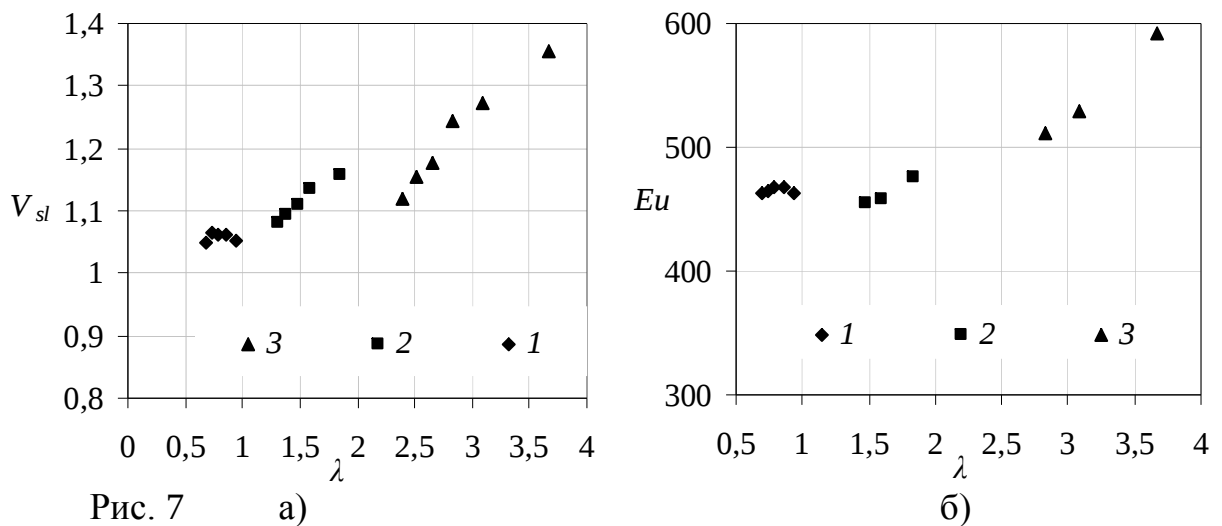


Рис. 7 а) Влияние на безразмерную скорость вращения плотности орошения; б) Влияние на критерий Эйлера плотности орошения. 1, 2, 3 – трехфазный слой с частицами $\rho_s=1100$ кг/м³, $d_s=5$ мм при расходе жидкости $Q_l=90$ л/ч, 165 л/ч, 305 л/ч соответственно; $R_0=50$ мм, $h=0.3$, $s=5.7\%$, $\xi=0.7$, $Q_g=85-125$ м³/ч.

При рассмотрении режима движения жидкости и газа через трехфазный вихревой слой можно воспользоваться модельными представлениями, разработанными для трехфазного слоя, реализуемого в гравитационном поле. Часто гидродинамические режимы представлены в виде зависимости расходного объемного газосодержания от критерия Фруда газожидкостной смеси. По измеренным значениям центробежного ускорения, расходов газа и жидкости определили, что при значениях расходного газосодержания $\beta = Q_g / (Q_g + Q_l) = 0.996 \div 1$ и критерия Фруда $Fr = 80-370$ режим движения газа и жидкости в зернистом слое можно отнести к дисперсному.

Рассмотрена модель, по которой через зернистый слой фильтруется газожидкостная эмульсия с эффективной плотностью. Газосодержание эмульсии принималось равным расходному объемному газосодержанию смеси $\varphi_g = \beta$, где $\beta = Q_g / (Q_g + Q_l)$. При расчете скорости вращения слоя в уравнении (2) принималось значение объемного содержания твердых частиц в слое $\varphi_s = 0.5$, а толщина слоя определялась по измеренному объему твердой фазы в вихревом аппарате, и составляло величину близкую к значению $\xi = 0.7$.

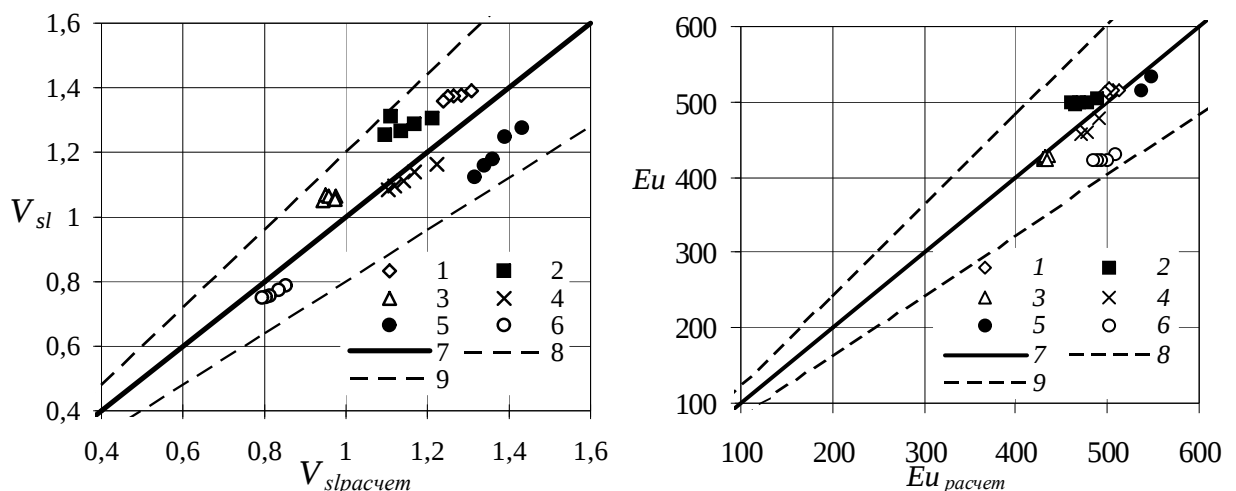


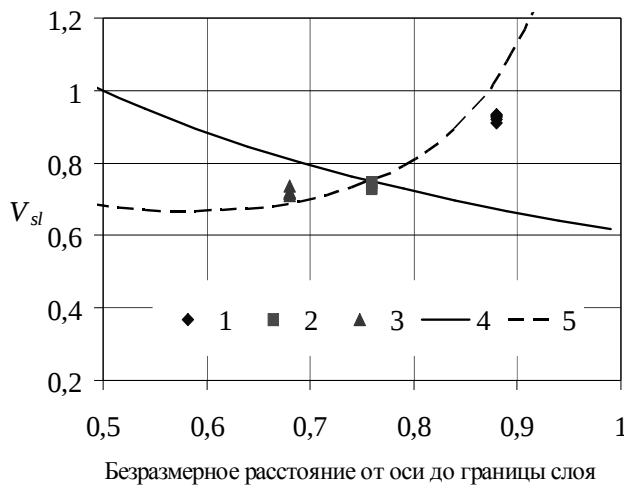
Рис. 8. а)

б)

а) Сравнение экспериментальных значений безразмерной скорости вращения зернистого слоя с расчетом $V_{sl_расчет}$ по (2); б) Сравнение экспериментальных значений критерия Эйлера с расчетом $Eu_{расчет}$ по (3). 1, 2, - частицы $\rho_s = 1100 \text{ кг/м}^3$, $d_s = 3 \text{ мм}$ и $d_s = 4 \text{ мм}$, $Q_l = 90 \text{ л/ч}$; 3, 4, 5 - частицы $\rho_s = 1100 \text{ кг/м}^3$, $d_s = 5 \text{ мм}$ расход воды $Q_l = 90 \text{ л/ч}$, 165 л/ч , 305 л/ч соответственно; 6 – частицы $\rho_s = 2500 \text{ кг/м}^3$, $d_s = 3 \text{ мм}$, $Q_l = 90 \text{ л/ч}$; 7, 8, 9 – расчет по уравнениям $\pm 20\%$.

На рисунке 8 показано, что расчет по уравнениям М.А. Гольдштика с использованием квазигомогенной модели движения газожидкостной смеси через вращающийся зернистый слой и экспериментальные значения находятся в пределах $\pm 20\%$. Для трехфазного зернистого слоя из экспериментальных данных в уравнении (4) определены эмпирические коэффициенты, которые равны $A = 0.4$ и $B = 0.8$.

На рис. 9 представлены результаты экспериментов с различным объемом твердой фазы в вихревом аппарате. На рис. 9 видно, что при уменьшении загрузки твердой фазы наблюдается увеличение скорости вращения трехфазного слоя. Расчет по уравнению (2) с использованием квазигомогенной модели движения газожидкостной смеси и экспериментальные значения находятся в хорошем соответствии при безразмерном расстоянии ξ от оси до границы вихревого слоя равном от 0.65 до 0.8, но при уменьшении толщины слоя расчет по уравнению (2) и экспериментальные данные начинают расходиться.



1, 2, 3 – экспериментальные значения безразмерной скорости вращения зернистого слоя;
 4 – расчет по уравнению (2);
 5 – расчет по уравнению (10).
 $R_0=50$ мм, $h=0.3$, $s=5.7\%$,
 $Q_l=90$ л/ч, $Q_g=85-120$ м³/ч,
 $\rho_s=2500$ кг/м³, $d_s=3$ мм.

Рис. 9. Влияние объемной загрузки твердой фазы на значение безразмерной скорости вращения слоя V_{sl} .

Качественно иная зависимость скорости вращения многофазного слоя от загрузки твердой фазы может быть получена, если использовать предположение², что в случае зернистого слоя момент импульса вихревого потока теряется в основном в результате «сухого» трения твердой фазы о поверхность аппарата. Зная зависимость нормальных напряжений на поверхности вихревого аппарата со стороны зернистого слоя из уравнения (1) при условии $\sigma_{rr}=\sigma_{\varphi\varphi}$, касательные напряжения трения твердой фазы о поверхность аппарата можно записать в виде:

$$\tau_{mp} = -f_{tr} \cdot \sigma_{rr}(r) \quad (9)$$

где $f_{tr} = const$ коэффициент трения зернистого слоя о поверхность аппарата. Исходя из этого, момент трения на поверхности вихревого аппарата равен: $M_{mp.s} = \int \tau_{mp}(r) \cdot r \cdot dS$ и будет складываться из момента трения о торцевые поверхности $2 \cdot M_{1mp.s}$ и момента трения $M_{2mp.s}$ о цилиндрическую поверхность

² Волчков Э.П., Дворников Н.А., Ядыкин А.Н. Моделирование сушки и удержания зерна в вихревых камерах с протоком воздуха через слой зерна// Пром. Теплотехника – 1999. т.21. № 2-3 - С. 72-78.

завихрителя. Баланс момента импульса для трехфазного зернистого слоя можно записать в следующем виде: $M_l + M_g = 2 \cdot M_{1mp.s} + M_{2mp.s}$.

Из решения уравнение баланса момента импульса, получена зависимость для расчета скорости вращения зернистого слоя в аппарате с плоскими торцевыми поверхностями (рис.1) при $H_0 = const$:

$$V_{sl} = \frac{\omega \cdot R_0}{W_g} = \frac{-2 \cdot z \cdot \xi^2 \cdot (1 + \lambda) + \sqrt{4 \cdot z^2 \cdot \xi^4 \cdot (1 + \lambda)^2 + 4 \cdot \chi \cdot (\eta + 1 + 2 \cdot z \cdot V_l \cdot \xi_l \cdot \lambda)}}{2 \cdot \chi} \quad (10)$$

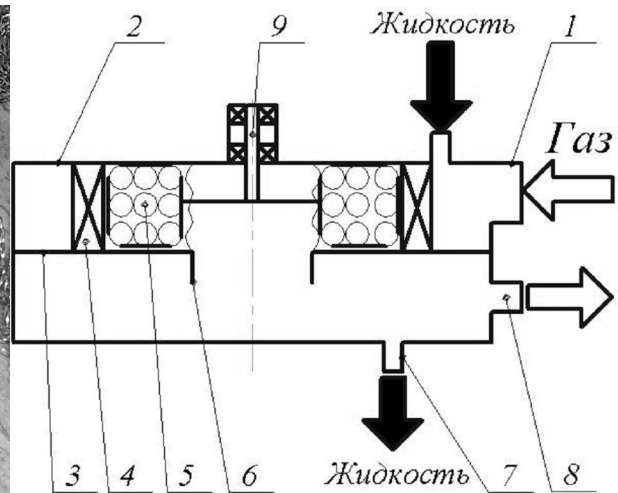
$$\text{где } \chi = \frac{f_{tr} \cdot \varphi_s \cdot (\rho_s - \rho_{lg})}{\rho_g} \cdot 4z \cdot \left[\frac{1 - \xi^5}{5} - \frac{\xi^2 (1 - \xi^3)}{3} + (1 - s) \cdot h \cdot \left(\frac{1 - \xi^2}{2} \right) \right],$$

$$\eta = \frac{3 \cdot C_{fs} \cdot (1 - \varphi_s) \cdot \varphi_s \cdot f_{tr} \cdot \rho_{lg}}{4 \cdot \psi^2 \cdot \rho_g} \cdot \frac{z \cdot R_0}{h^2 \cdot d_s} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{1 - \xi^3}{3 \cdot \xi} - \frac{(1 - \xi^2)}{2} \right) + (1 - s) \cdot h \cdot \left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \right]$$

На рис. 9 представлены экспериментальные значения безразмерной скорости вращения слоя при разном объеме твердой фазы и расчет по уравнениям (2) и (10) с использованием квазигомогенной модели движения газожидкостной смеси. На рис. 9 показано, что расчет по уравнению (10) качественно лучше описывает полученные экспериментальные данные (при объемном содержании частиц в слое $\varphi_s = 0.5$ и значении коэффициента трения $f_{tr} = 0.27$). Эти значения коэффициента трения и объемного содержания твердой фазы в слое совпадают со значениями, полученными в экспериментах М.А. Гольдштиком и В.Н. Сорокиным.



Рис. 10 а) Объемная проволочная насадка.



б) Схема вихревого аппарата с объемной насадкой.

Для увеличения интенсивности массопередачи между газом и жидкостью необходимо, чтобы режим движения в трехфазном слое был пенный, так как при этом режиме развивается максимальная поверхность контакта фаз газ-жидкость. Чтобы в трехфазном слое реализовывался пенный режим необходимо уменьшать критерий Фруда. Это возможно сделать за

счет увеличения центробежного ускорения, диаметра твердой фазы и за счет уменьшения объемного содержания твердой фазы.

Для процессов с участием газа, жидкости и твердой фазы предложено использовать вихревые аппараты с твердой фазой в виде объемной насадки (рис. 10а). Схема вихревого аппарата с объемной насадкой изображена на рис. 10б. Аппарат содержит устройство для равномерного подвода фаз 1, между торцевыми крышками 2 и 3 установлен завихритель 4. Между торцевыми крышками 2 и 3 в области между завихрителем 4 и сливным порогом 6 размещена объемная насадка 5. Вращение объемной насадки обеспечивается за счет тангенциального ввода потоков в вихревой аппарат. После взаимодействия с объемной насадкой газ и жидкость выводятся из аппарата через патрубки 7 и 8. В экспериментах использовался вихревой аппарат с $R_0=50$ мм, $h=0.62$, $s=5.5\%-11.5\%$ и малообъемные проволочные насадки с удельной поверхностью $53 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $105 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $158 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Установлено, что скорость вращения трехфазного слоя с объемной насадкой зависит от расхода газа нелинейно. С уменьшением площади проходного сечения скорость вращения трехфазного слоя возрастает, так же увеличивается перепад давления. С увеличением объема насадки скорость вращения многофазного слоя уменьшается, вращение слоя начинается при больших расходах газа, потому что увеличивается момент трения насадки (рис.11). Исследования показали, что для малообъемной проволочной насадки (объемное содержание твердой фазы в трехфазном слое 0.4%, 0.8% и 1.2%) структура трехфазного слоя подобна структуре пенно-вихревого слоя. Основное отличие здесь состоит в том, что трехфазный слой с объемной насадкой движется с постоянной угловой скоростью $\omega=const$, то есть скорость вращения слоя равна $W_{sl} = \omega \cdot r$. На основе баланса момента импульса можно получить уравнение для расчета скорости вращения трехфазного слоя с малообъемной насадкой. Если предположить, что со стороны газожидкостного потока действует момент сил трения $M_{mp.lg} = \int \tau_{lg} \cdot r \cdot dS$ и со стороны твердой фазы действует момент трения постоянной величины $M_{mp.s}=const$ баланс момента импульса для трехфазного слоя с объемной насадкой можно записать в следующем виде: - $M_l + M_g = M_{mp.lg} + M_{mp.s}$.

С учетом высказанных допущений для трехфазного слоя с объемной насадкой получено следующее уравнение для расчета скорости вращения:

$$V_{sl} = \frac{W_{sl0}}{W_g} = \frac{1 + 2 \cdot \lambda \cdot \xi_L \cdot v_L \cdot z - T}{2 \cdot z \cdot \left[\frac{\xi \cdot (1 + \lambda)}{2} + \sqrt{\frac{\xi^2 \cdot (1 + \lambda)^2}{4} + \frac{f \cdot (1 - \xi^5) \cdot (1 + 2 \cdot \lambda \cdot \xi_L \cdot v_L \cdot z - T)}{5 \cdot z}} \right]} \quad (11)$$

где $T = \frac{M_{mp.s}}{M_{gex}} = \frac{const}{\rho_g \cdot Q_g \cdot R_0 \cdot V_0}$ - относительный момент трения; M_{gex} - момент импульса газа на входе в слой.

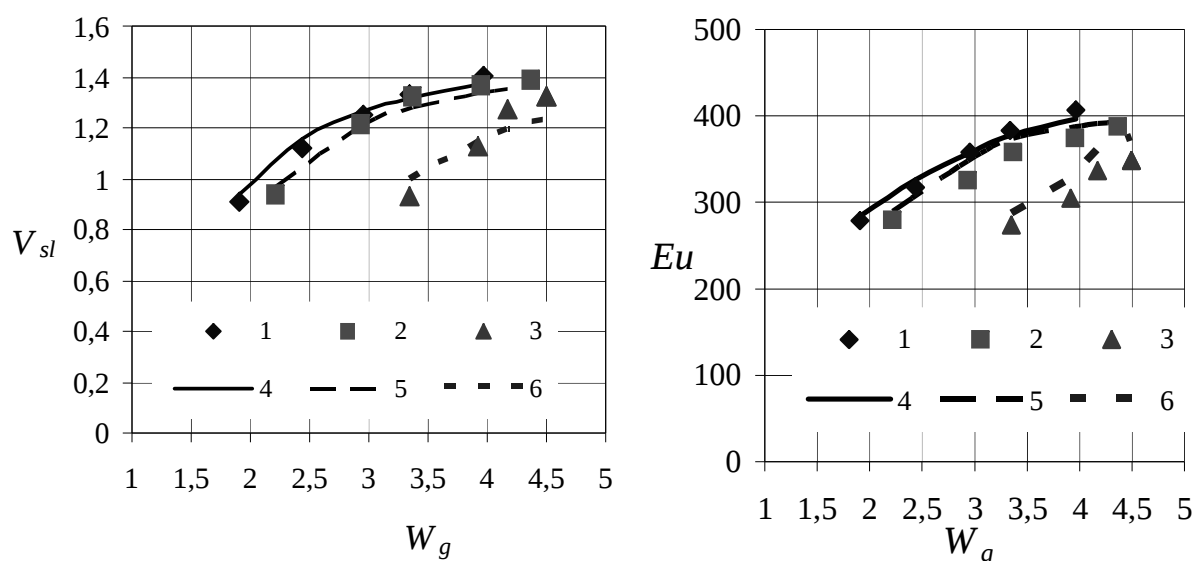


Рис. 11. Зависимость безразмерной скорости вращения многофазного слоя и критерия Эйлера от расходной скорости газа. 1, 2, 3 – экспериментальные значения для насадки с удельной поверхностью 53 м²/м³, 105 м²/м³ и 158 м²/м³ (объемное содержание насадки в многофазном слое 0.4%, 0.8% и 1.2%;) соответственно; 4, 5, 6 – расчет по уравнениям (11) и (12) для насадки с удельной поверхностью 53 м²/м³, 105 м²/м³ и 158 м²/м³ ($M_{mp.s}=7$ мН·м; 9 мН·м; 21 мН·м). $R_0=50$ мм, $h=0.62$, $\xi=0.5$, $s=8.6\%$, $Q_l=100$ л/ч.

Перепад давления в вихревом аппарате с малообъемной насадкой предполагали, что равен весу газожидкостного слоя, а потерей давления за счет фильтрации газожидкостного потока через малообъемную насадку можно пренебречь. С этими допущениями получили критерий Эйлера вихревого аппарата с малообъемной насадкой, который с учетом сопротивления завихрителя равен:

$$Eu = \frac{\Delta P_{BA}}{\rho_g \cdot W_g^2} = \frac{A}{4 \cdot z^2 \cdot \sin^2 \theta} + B \cdot \frac{(1 - \varphi_g) \cdot \rho_l}{\rho_g} \cdot V_{sl}^2 \cdot \frac{1}{2} (1 - \xi^2) \quad (12)$$

Из экспериментальных данных в уравнении (11) определялось значение момента трения насадки $M_{mp.s}$, а в уравнении (12) по измеренной скорости вращения определялись эмпирические коэффициенты A и B . Как видно из графиков на рис. 11 имеется хорошее соответствие экспериментальных данных и расчета по предложенной модели.

Полностью исключить истирание объемной насадки и поверхностей вихревого аппарата, изображенного на рис. 10б, можно, если объемную насадку 5 жестко соединить со специальным валом 9, установленным соосно с завихрителем на подшипниках, обеспечивающих вращение вала с объемной насадкой. Экспериментальные данные для проволоочной насадки с удельной

поверхностью $53\text{м}^2/\text{м}^3$ и расчет по уравнениям (11) и (12) представлены на рис. 12. Из экспериментальных данных получено, что в уравнении (11) момент сил трения объемной насадки, установленной на подшипниках, можно принять равным нулю $M_{mp.s}=0$, а коэффициенты в уравнении (12) для вихревого аппарата с лопаточным завихрителем равны $A=0.3$ и $B=0.7$.

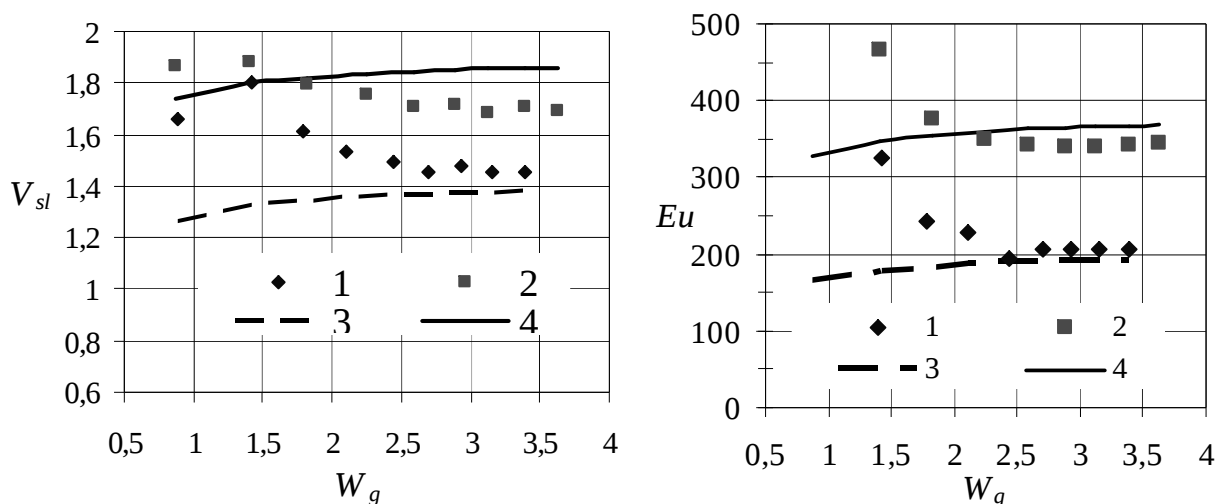


Рис. 12. Зависимость безразмерной скорости вращения многофазного слоя и критерия Эйлера для вихревого аппарата с объемной насадкой на подшипниках. 1, 2 – экспериментальные значения для аппарата с $s=12.2\%$ и $s=6.7\%$; 3, 4 – расчет по уравнениям (11) и (12) для аппарата с $s=12.2\%$ и $s=6.7\%$. $R_0=55\text{мм}$, $h=0.564$, $\xi=0.455$, $Q_l=90\text{ л/ч}$.

Из графиков на рис. 12 видно, что с уменьшением относительного проходного сечения завихрителя безразмерная скорость вращения слоя и критерий Эйлера увеличиваются. При малых расходах газа на графиках можно выделить «начальный участок», на котором безразмерная скорость вращения многофазного слоя и критерий Эйлера превышают расчетные значения. Наличие начального участка, связано с формированием трехфазного слоя. С уменьшением площади относительного проходного сечения слой формируется при меньших расходах газа, поэтому величина начального участка при уменьшении проходного сечения уменьшается. После формирования многофазного слоя отличие расчетных и экспериментальных значений безразмерной скорости вращения и критерия Эйлера не превышает $\pm 15\%$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. При использовании вихревых аппаратов для процессов с большими соотношениями расходов жидкости и газа, жидкость необходимо подавать в вихревой аппарат с закруткой. При расчете скорости вращения и

перепада давления пенно-вихревого слоя в вихревом аппарате (с дополнительной закруткой жидкости, при плотности орошения до 22 кг жидкости на 1кг подаваемого в аппарат газа) рекомендуется использовать известное уравнение на основе баланса момента импульса, соответствующее условию отеснения слоя от поверхности завихрителя. Значение коэффициента трения принимать равным $C_f=0.025$, газосодержания слоя $\varphi_g=0.6$. При расчете перепада давления газа в вихревом аппарате с лопаточным завихрителем принимать значения коэффициентов $A=0.8$, $B=0.7$.

2. Гидродинамика трехфазного суспензионного слоя (при объемной концентрации твердых частиц в суспензии до 25% размером менее 300 мкм и плотностью до 7000 кг/м³) с точностью не хуже $\pm 20\%$ описывается соответствующими уравнениями для газожидкостного слоя, в которых вместо плотности жидкости необходимо использовать плотность суспензии.

3. Процесс теплоотдачи между торцевой поверхностью и газожидкостным (трехфазным суспензионным) слоем характеризуется высокими значениями коэффициента теплоотдачи (для воды и водных суспензий $\alpha=10-25$ кВт/м²·К). Экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи между торцевой поверхностью и газожидкостным (трехфазным суспензионным) слоем в зависимости от геометрии вихревого аппарата, расходов газа, вязкости жидкости, содержания твердых частиц в суспензии с точностью не хуже $\pm 20\%$, обобщает предложенное эмпирическое соотношение в диапазоне чисел $Re=2000-70000$ и $Pr=7-185$.

4. Для вращающегося зернистого слоя на основе рассмотрения баланса момента импульса, в предположении, что момент импульса газа и жидкости изменяется в результате действия момента сухого трения зернистого слоя о поверхность вихревого аппарата (значение коэффициента трения $f_{tr}=0.27$, объемное содержание частиц в зернистом слое $\varphi_s=0.5$), разработанное уравнение для расчета скорости вращения зернистого слоя качественно и количественно описывает экспериментальные данные.

5. При значениях расходного объемного газосодержания $Q_g/(Q_g + Q_l) = 0.996 \div 1$ и критерия Фруда $Fr=80-370$ режим движения газа и жидкости в трехфазном зернистом слое дисперсный. При дисперсном режиме, для расчета с точностью не хуже $\pm 20\%$ перепада давления газа и скорости вращения трехфазного зернистого слоя в вихревом аппарате, газожидкостную смесь предлагается представлять как гомогенную среду, с эффективной плотностью $\rho_{lg} = \varphi_g \cdot \rho_g + (1 - \varphi_g) \cdot \rho_l$, которая фильтруется через зернистый слой. Газосодержание подаваемой эмульсии предлагается принимать равным расходному объемному газосодержанию $\varphi_g = Q_g/(Q_g + Q_l)$.

6. Для вихревого аппарата с малообъемной насадкой (объемное содержание твердой фазы в многофазном слое 0.4-1.2%) структура многофазного слоя аналогична структуре пенно-вихревого слоя, но

многофазный слой вращается с постоянной угловой скоростью. На основе баланса момента импульса, в предположении, что момент импульса газа и жидкости изменяется в результате действия момента трения газожидкостного потока (слой оттесняется от завихрителя, коэффициент трения газожидкостного потока $C_f=0.025$, газосодержание слоя $\varphi_g=0.6$), а со стороны объемной насадки дополнительно действует момент трения скольжения постоянной величины (7-21 мН·м), разработанные уравнения для расчета скорости вращения многофазного слоя и перепада давления в вихревом аппарате с малообъемной насадкой с точностью не хуже $\pm 15\%$ качественно и количественно описывают экспериментальные данные.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

C_f - коэффициент трения газожидкостного (пенно-вихревого) слоя;
 $C_{fs} = 2 \cdot \psi$ - коэффициент сопротивления частиц; d_s - диаметр частиц, м;
 $\overline{d_s} = d_s / R_0$ - безразмерный диаметр частиц; $Eu = \Delta P_{BA} / \rho_g \cdot W_g^2$ - критерий Эйлера;
 $F_r = \frac{3}{4} \cdot \frac{C_{fs}}{d_s} \cdot \frac{(1-\varphi_s) \cdot \varphi_s}{\psi^2} \cdot \rho \cdot V_r^2 - \varphi_s \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r$ - сила, действующая на частицы в объеме со стороны потока; $Fr = (V_{rl} + V_{rg})^2 / g \cdot d_s (1-\varphi_s)^2$ - критерий Фруда;
 $f = C_f \cdot \rho_l \cdot (1-\varphi_g) / \rho_g$ - безразмерный параметр; H_0 - высота аппарата, м; H - текущая высота на радиусе r , м; $h = H_0 / R_0$ - безразмерная высота аппарата; Q - объемный расход, м³/с; R_0 - радиус завихрителя, м; R_1 - граница многофазного слоя, м; R_L - радиус ввода жидкости, м; s - относительное проходное сечение завихрителя (направляющего аппарата); W_{sl} - скорость вращения многофазного слоя (W_{sl0} - на радиусе R_0), м/с;
 $W_g = Q_g / \pi \cdot R_0^2$ - расходная скорость газа, м/с; V_r - радиальная скорость потока; V_0 - тангенциальная составляющая скорости газа на входе в слой, м/с; V_l - тангенциальная составляющая скорости ввода жидкости в слой, м/с;
 $V_{sl} = W_{sl0} / W_g$ - безразмерная скорость вращения многофазного слоя;
 $v_L = V_l / W_g$ - безразмерная скорость ввода жидкости в многофазный слой;
 $z = s \cdot h / \sin \theta$ - геометрическая характеристика завихрителя; ΔP_{BA} - перепад давления в вихревом аппарате, Па; θ - угол наклона канала в завихрителе к радиусу в горизонтальной плоскости; $\lambda = \rho_l \cdot Q_l / \rho_g \cdot Q_g$ - удельный массовый расход жидкости; $\xi = R_1 / R_0$ - безразмерное расстояние от оси до границы слоя; $\xi_L = R_L / R_0$ - безразмерный радиус ввода жидкости; ρ - плотность, кг/м³;
 $\overline{\rho_s} = \rho_s / \rho$ - относительная плотность твердой фазы; φ - объемная доля;
 ψ - минимальная относительная площадь проходного сечения потока в зернистом слое, (при $\varphi_s < 0.6$, $\psi = 1 - 1.164 \cdot \varphi_s^{\frac{2}{3}}$); ω - угловая скорость вращения слоя.
Индексы: l, g, s - жидкость, газ и твердая фаза.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Кувшинов Г.Г., Трачук А.В. Расчет основных характеристик центробежно-барботажного аппарата // Химическая промышленность сегодня - 2003. №8. - С. 39-50.
2. Трачук А.В., Кувшинов Г.Г. Исследование теплообмена между слоем и торцевой поверхностью в центробежно-барботажном аппарате // Химическая промышленность сегодня - 2006. №3. - С. 45-51.
3. Трачук А.В. Влияние плотности орошения жидкости на гидродинамику центробежно-барботажного аппарата // Известия ВолгГТУ. Серия Реология. Процессы и аппараты химической технологии. - 2007. №11(37). – С. 87-89
4. Трачук А.В., Кувшинов Г.Г. Исследование гидродинамики трехфазного суспензионного центробежно-барботажного аппарата // Сборник научных трудов НГТУ. - 2005. № 2(40). - С. 23-28.
5. Кувшинов Г.Г., Трачук А.В. Гидродинамика и теплообмен вращающегося многофазного слоя в вихревых аппаратах // Тезисы доклада третьей международной конференции “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”, 21-23 октября 2008 г. Москва. - С. 79-80.
6. Г.Г. Кувшинов, А.В. Трачук Особенности гидродинамики трехфазного слоя газ - жидкость - твердое в вихревой камере // Тезисы доклада XXVIII Сибирского теплофизического семинара, Новосибирск. - 2005. – С. 119-120.
7. Заварухин С.Г., Яворский А.И., Трачук А.В. Центробежно-барботажный аппарат // III Всероссийская научно-техническая конференция "НОВЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ". Сб. материалов. Пенза. - 2001. – С. 35-38
8. Трачук А.В., Кувшинов Г.Г. Исследование гидродинамики трехфазного суспензионного центробежно-барботажного аппарата // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИЯ // Материалы докладов всероссийской научной конференции. Новосибирск. - 2003. - С. 162-163.
9. Трачук А.В., Кувшинов Г.Г. Исследование теплообмена между слоем и торцевой поверхностью в центробежно-барботажном аппарате // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИЯ // Материалы докладов всероссийской научной конференции. Новосибирск: Изд-во: НГТУ.- 2004. - С.192-193.
10. Дутова Е.В., Трачук А.В. Исследование гидродинамики трехфазной системы в вихревой камере с регулярно - упорядоченной структурой // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИЯ // Материалы докладов всероссийской научной конференции молодых ученых в 7 частях. Новосибирск: Изд-во: НГТУ. - 2005. – С. 209-210.
11. Кувшинов Г.Г., Трачук А.В. Способ интенсификации многофазных химико-технологических процессов и вихревые аппараты для его осуществления // Тезисы доклада Всероссийской конференции «Наука. Промышленность. Оборона», Новосибирск, 2006. - С. 234-238.