

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ И
НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ им. Н. С. КУРНАКОВА

Арх. 1020

На правах рукописи

СЕРМАНИЗОВ СУТТИБАЙ СЕРМАНИЗОВИЧ

**ГИДРОДИНАМИКА, МАССООБМЕН И
ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ ПРИ ОБТЕКАНИИ
РЕГУЛЯРНО РАЗМЕЩЕННЫХ НАСАДОЧНЫХ
ТЕЛ**

(05. 17. 08 — процессы и аппараты химической технологии)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

МОСКВА 1991

Работа выполнена в Казахском химико-технологическом институте.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ДИЛЬМАН В. В.;
доктор технических наук, профессор ЖИВАЙКИН Л. Я.;
доктор технических наук, профессор ЧЕХОВ О. С.

Ведущая организация: Уральский Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский химический институт (УНИХИМ).

Защита состоится « 26 » июня 1991 г. в 10 часов на заседании Специализированного Совета Д 002. 37. 01 при Институте общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова АН СССР по адресу: 117907, ГСП-1, Москва, В-71, Ленинский проспект, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке химической литературы АН СССР.

Автореферат разослан « 15 » авг 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
кандидат химических наук



М. А. ГЛУШКОВА.

Актуальность работы. Постановлением Верховного Совета СССР "О неотложных мерах экологического оздоровления страны" предусмотрено "... в 1990-1995 годах улучшение состояния окружающей среды в городах и населенных пунктах, где уровень загрязнения воздушного бассейна многократно превышает предельно-допустимые концентрации, до нормативных требований". Решение такой важной задачи за короткий срок возможно только при создании высокоэффективных газоочистных аппаратов, отличающихся простотой изготовления, низкой материалоемкостью и энергоемкостью.

Последним требованиям отвечают аппараты с регулярной насадкой, применяемые, в частности, для очистки больших объемов отходящих газов промышленных предприятий и электростанций (Малюсов, 1987). Однако за последние годы в нашей стране наметилось все увеличивающееся отставание по сравнению с развитием капиталистическими странами в разработке различных типов регулярных насадок (Кафаров, Кулов, Дорохов, 1990).

Известные конструкции регулярных насадок отличаются сложностью изготовления и монтажа, а главное – практически не пригодны для обработки газов и жидкостей, содержащих большое количество твердых примесей и слипающихся веществ. В настоящее время проектирование регулярных насадок осуществляется без учета закономерностей движения и взаимодействия контактирующих фаз, поэтому в них не достигается достаточно эффективное использование энергии потоков для интенсификации технологических процессов.

Известно, что отрывное течение, возникающее в результате прохождения потока в каналах с турбулизирующими элементами или при обтекании различных тел, сопровождается образованием вихрей, которые содержат основную часть энергии потока и являются источниками его пульсаций. Поэтому от характера образования, движения и взаимодействия вихрей зависит интенсивность процессов тепло- и массообмена. В последнее время на основе использования этих закономерностей разрабатываются и применяются тепломассообменные и газоочистные аппараты, повышенная эффективность которых основана на обтекании регулярно размещенных насадочных тел различной формы.

Такая конструкция насадки имеет следующие очевидные преимущества: простота конструкции и изготовления; незабываемость твердыми примесями; низкая металлоемкость – для насадок пластинчатой формы.

круглого и квадратного поперечного сечений она составляет 14,40 и 34 кг/м³, соответственно (для сравнения: кольцевая насадка - 300+950 кг/м³, регулярная блочная насадка - 90 кг/м³); возможность изготовления из неметаллических материалов и отходов машиностроительных предприятий; низкое гидравлическое сопротивление - 300-600 Па; широкий диапазон скоростей газа от 2 до 4,5 м/с и плотностей орошения от 25 до 250 м³/(м²ч); высокая эффективность вследствие реализации активного гидродинамического режима, включающего стадии распыления и пульсации потока и многократное чередование стадий распыления и сепарации жидкости на небольшой высоте контактной зоны. Благодаря таким достоинствам колонны с регулярно размещенными насадочными телами можно отнести к новым перспективным теплообменным аппаратам. Однако в настоящее время отсутствуют методы их расчета, имеющие реальное физическое обоснование. Это вызвано в первую очередь сложностью процессов возникновения, движения и взаимодействия вихревых потоков, не поддающихся строгому математическому моделированию. Во-вторых, формы насадочных тел и их пространственное расположение могут быть многовариантны, следовательно, количество расчетных уравнений должно увеличиваться пропорционально. В-третьих, широкий диапазон устойчивой работы рассматриваемого контактного устройства при скоростях газа до 4,5 м/с и плотностях орошения до 250 м³/(м²ч) накладывает свой отпечаток не только на выбор методов расчета, но и на выбор конструктивных параметров. Поэтому разработка высокоэффективных конструкций контактных устройств с регулярно размещенными насадочными телами и научно обоснованной методики их расчета, а также выбор области их рационального промышленного применения является важной народно-хозяйственной задачей. Кроме того, отдельные выводы и рекомендации настоящей работы могут иметь научный и практический интерес и в других областях техники, так как обтекание регулярно расположенных тел различной формы является распространенным видом движения потоков.

Работа выполнялась в соответствии с Программой исследований по важнейшим фундаментальным проблемам АН СССР "Разработка основ создания новых процессов и аппаратов химической технологии и методов интенсификации существующих процессов" (подраздел 1.2 в) на период 1978-1990 г.г. и координационными планами научно-исследовательских работ АН СССР по направлению "Теоретические основы химической технологии" (подраздел 2.27.2.6.21) на 1981-1985 г.г., (подраздел 2.27.2.6.17) на 1986-1990 г.г. и совместных работ АН КазССР, Миноб-

разования КазССР и отраслевых министерств, а также по тематическому плану научно-исследовательских работ Казахского химико-технологического института. Номера государственной регистрации тем: 70079424, 01820006590, 02860107308

Цель работы: Создание аппаратов нового типа для процессов массообмена и пылеулавливания на основе использования закономерностей образования и взаимодействия вихрей при обтекании системы регулярно размещенных насадочных тел, разработка научно-обоснованных методов расчета и проектирования их, а также опытно-промышленная апробация и внедрение разработанных аппаратов в промышленность.

Для решения указанной проблемы в работе ставились следующие основные задачи:

- раскрытие и теоретическое описание механизма взаимодействия вихрей при обтекании регулярно размещенных насадочных тел различных форм;
- изучение основных закономерностей гидродинамики и массообмена при взаимодействии газа и жидкости в условиях несимметричного вихреобразования;
- создание высокоэффективных и интенсивных массообменных аппаратов;
- разработка методов расчета и проектирования аппаратов с регулярно размещенными насадочными телами;
- опытно-промышленная апробация и внедрение разработанных газоочистных аппаратов в промышленность.

Научная новизна:

- показано, что использование закономерностей образования и взаимодействия вихрей при обтекании системы регулярно размещенных тел предполагает принципиально новое направление создания массообменных аппаратов с регулярной насадкой;
- раскрыта физическая картина движения однофазного и двухфазного потоков в слое регулярно расположенных насадочных тел различной формы и выявлены условия возникновения полупериодного и одноперидного режимов одновременного вихреобразования, способствующих значительной турбулизации потоков;
- выявлены общие гидродинамические закономерности работы аппаратов с насадочными телами круглого, квадратного сечений и пластинчатой формы, что позволило использовать единый подход к расчету гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя;

- определен диапазон плотностей орошения ($90 < \Delta < 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$), разграничивающий области различного влияния удельных нагрузок по жидкости (до $250 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$) на структуру взаимодействующих потоков, гидродинамику и массообмен в аппаратах с регулярно размещенными насадочными телами;

- выявлено, что при описании влияния плотности орошения на закономерности взаимодействия вихрей, образующихся при обтекании регулярно размещенных насадочных тел, необходимо учитывать "эффективную" ширину элементов, определяемую с учетом взаимодействия жидкости с образующимися вихрями;

- на основании выявленных гидродинамических закономерностей вихреобразования получены расчетные уравнения для определения коэффициентов сопротивления регулярно размещенных насадочных тел в однофазном и двухфазном потоках, гидравлического сопротивления сухого и орошаемого аппаратов, а также количества удерживаемой жидкости в слое насадки;

- раскрыт механизм процесса дробления жидкости на капли при низких плотностях орошения и на струйки и капли при высоких плотностях орошения под воздействием вихревого движения газового потока;

- исходя из условий взаимодействия вихревых цепочек между собой и одновременности вихреобразования, определены параметры рационального размещения насадочных элементов в объеме рабочей зоны аппарата, при которых достигается наибольшая интенсивность массопередачи и степень улавливания пыли;

- на основании учета диссипативного механизма передачи энергии получены зависимости для определения коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах;

- на основе математического описания распределения концентрации по высоте рабочей зоны аппарата проведена оптимизация приведенных затрат, позволяющая определить оптимальные режимные и конструктивные параметры аппаратов с регулярно размещенными насадочными телами.

Практическая ценность и реализация работы.

I. Разработаны новые и перспективные конструкции аппаратов с регулярно размещенными насадочными телами, учитывающие закономерности взаимодействия вихрей в двухфазном потоке, защищенные авторскими свидетельствами СССР.

2. Результаты экспериментальных и теоретических исследований положены в основу разработанных методик расчета и практических рекомендаций по проектированию аппаратов для осуществления процессов массообмена и пылеулавливания.

3. Результаты работы были использованы при проектировании и внедрении промышленных аппаратов для очистки отходящих газов от вредных примесей и пыли на следующих предприятиях:

- Джамбулское ПО "Химпром" - улавливание фтористого водорода в производстве монокальцийфосфата. Фактический экологический эффект - 531,2 тыс.руб.;

- Джамбулское ПО "Химпром" - очистка газов, отходящих от шлаковых леток и желобов производства фосфора. Фактический эколого - экономический эффект - 778,6 тыс.руб., в т.ч. экономический - 153,8 тыс.руб. и экологический - 614,8 тыс.руб.;

- Чимкентское ПО "Фосфор" - улавливание пыли триполифосфата натрия. Фактический эколого-экономический эффект за 1985 г. - 208,7 тыс.руб., 1986 г. - 852,3 тыс.руб., 1987 г. - 185,6 тыс.руб., в т.ч. экономический эффект - 165,0 тыс.руб. и экологический - 1081,6 тыс.руб.;

- Актюбинский завод хромовых соединений - улавливание пыли производства сернистого натрия. Фактический экологический эффект - 421,6 тыс.руб.;

- Актюбинский завод хромовых соединений - улавливание пыли производства хромового ангидрида. Фактический экологический эффект - 446,6 тыс.руб.

4. На основании результатов исследований и опытно-промышленных испытаний аппаратов с регулярной насадкой ВНИИСере выданы исходные данные на проектирование: аппаратурно-технологических схем очистки пластовой воды и газоздушных выбросов от сероводорода на Гримневском и Загайпольском рудниках подземной выплавки серы, установок очистки газоздушных выбросов от сероводорода Гаурдакского и Куйбышевского серных заводов, на реконструкцию цеха очистки пластовых и дренажных вод от сероводорода Еврововского ПО "Сера". Внедрение этих разработок позволит получить экономический эффект в сумме 987,5 тыс.рублей.

5. УРАЛГИПРОХИМом выполнены проекты аппаратурно-технологических схем газоочистки с использованием методик расчета аппаратов с регулярной насадкой для строящейся второй очереди производств сернистого натрия и окиси хрома на Актюбинском заводе хромовых соединений.

6. Методики расчета аппаратов с регулярной насадкой также используются при расчете и проектировании газоочистного оборудования отраслевой научно-исследовательской лабораторией (ОНИЛ) Государственного производственного объединения (ГПО) "Фосфор", КАЗНИИГПРО-ФОСФОРОМ (г. Чимкент), ВНИИСерой (г. Львов) и УРАЛГИПРОХИМОМ (г. Свердловск).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзных конференциях: "Создание и внедрение аппаратов с активными гидродинамическими режимами в текстильной промышленности и производстве химических волокон" (Москва, 1989 г.); "Технология неорганических веществ и минеральных удобрений" (Днепропетровск, 1976 г., Чимкент, 1981 г.); "Современные машины и аппараты химических производств" (Чимкент, 1977 г., 1980 г., 1988 г., Навои, 1983 г.); "Проблемы охраны труда" (Кишинев, 1978), "Пути создания безотходных и малоотходных производств в основной химии" (Свердловск, 1981 г.); "Пути совершенствования, интенсификации и повышения надежности машин и аппаратов в основной химии" (Сумы, 1980 г., 1982 г., 1986 г.); "Химреактор-8 (Чимкент, 1983 г.); на республиканских конференциях: "Охрана природы и природоиспользование в Казахстане" (Целиноград, 1976 г.); "Использование отходов химической промышленности и создание безотходных технологических процессов (Алма-Ата-Чимкент, 1980 г.), "Внедрение научно-исследовательских и производственно-технических работ по химии и химической технологии" (Караганда, 1985 г.) и на научно-технических конференциях Казахского химико-технологического института (Чимкент, 1972-1989 г.г.).

Публикации. По теме диссертации депонирована 1 монография, издана 1 монография, опубликованы более 80 статей и сообщений, получено 9 авторских свидетельств СССР.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений, включающих материалы и документы, подтверждающие промышленные внедрения и экономическую эффективность результатов работы. Работа изложена на 319 стр., в том числе: основной текст на 234 стр., 19 фотографий на 12 стр., 87 рис. на 73 стр., 7 табл. на 9 стр., список литературы - 230 наименований на 26 стр., приложения - 118 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель

исследования и представлены основные достигнутые результаты.

Глава I. Закономерности обтекания регулярно размещенных насадочных тел. Однофазный поток.

Анализ литературных данных по обтеканию регулярно размещенных тел показывает, что на закономерности этого процесса значительное влияние оказывает расстояние между телами в вертикальном и радиальном (горизонтальном) направлениях, а также свидетельствует о неочиданных распределениях сил и давления, усилении или ослаблении процесса взаимодействия вихрей.

При обтекании системы элементов из тел шаровой формы установлено, что максимум гидравлического сопротивления достигается при вертикальном шаге $t_g = 4,7d_w$ (где d_w — диаметр шаров), когда наступает (Балабеков, Петин, 1985) режим одновременного (синфазного) вихреобразования. В этом режиме (именуемом однопериодным) происходит одновременный срыв вихрей с обтекаемых тел, и время пробега оторвавшихся вихрей от впередирасположенных тел совпадает со временем образования новых вихрей за нижерасположенными элементами. Такой одновременный срыв вихрей за цепочкой элементов обуславливает максимальное воспроизводство вихрей, что приводит к повышенному потреблению энергии.

За призматическими (плохообтекаемыми) телами с круглым, квадратным, прямоугольным, треугольным сечениями, телами пластинчатой формы и т.д. происходит несимметричный или шахматный срыв вихрей (Карман, 1912), в результате чего образуется дорожка Кармана. В отличие от дорожки за сферой (шаром), обладающей периодом движения, след за призматическими телами имеет еще и полупериод, который приводит к тому, что элементы, расположенные с шагом в половину меньше, чем при симметричном срыве, будут формировать вихри одновременно.

Эти данные относятся в основном (кроме тел шаровой формы) к обтеканию одиночных и парных элементов однофазным потоком. С целью установления особенностей отрывного течения потока в системе регулярно расположенных элементов (круглого, квадратного сечений и пластинчатой формы) были проведены экспериментальные исследования в следующем диапазоне изменения конструктивных параметров: вертикального шага $t_g = (1,5+6,5)\delta$ и радиального шага $t_p = (1,5+6)\delta$ расположения насадочных элементов при коридорном и шахматном их размещении. Ширина на тела изменялась от 0,04 до 0,15 м. Отношение длины l к ширине δ насадочных элементов составляло 1,5.

Экспериментальными исследованиями обтекания однофазным потоком

плохообтекаемых тел при изменении вертикального шага t_{β} от $1,5d$ до $6,5d$ (рис.1) установлено наличие двух экстремумов (пиков) изменения гидравлического сопротивления: в полупериодном и однопер-иодном режимах одновременного вихреобразования (рис.2). Причем шаги по вертикали, соответствующие этим пикам, зависят от формы насадочных тел. Первый пик для насадочных тел с круглым поперечным сечением (цилиндров) соответствует $t_{\beta} \approx 2,0d$ (кривая 1), квадратным сечением - $t_{\beta} \approx 3,0d$ (кривая 3) и пластинчатой формы - $t_{\beta} \approx 2,0d$ (кривая 2), что хорошо согласуется с литературными данными. В полупериодном режиме повышенное потребление энергии газового потока происходит потому, что одновременный срыв вихрей за цепочкой элементов сочетается с максимальным их воспроизводством. Кроме того, из-за уменьшения расстояния между телами в два раза происходит более интенсивное взаимодействие вихрей, образовавшихся за элементами, расположенными выше и ниже по потоку.

При дальнейшем увеличении расстояния между насадочными элементами в вертикальном направлении гидравлическое сопротивление последующих аппаратов снижается. Минимум гидравлического сопротивления насадки круглого сечения приходится на вертикальный шаг $t_{\beta} \approx 3,0d$, что также хорошо согласуется с литературными данными. Как показывают экспериментальные данные, для насадок квадратного сечения и пластинчатой формы минимум гидравлического сопротивления приходится на $t_{\beta} \approx 5,0d$ и $3,0d$, соответственно. Появление минимумов обусловлено неодновременным (несинфазным) образованием и срывом вихрей, когда происходит срыв еще необразовавшихся вихрей. В этом случае участвует в процессе минимальное количество вихрей.

Второй пик гидравлического сопротивления, соответствующий однопер-иодному режиму вихреобразования, приходится: для насадки круглого сечения на $t_{\beta} \approx 4,0d$, квадратного сечения на $t_{\beta} \approx 6,0d$ и пластинчатой формы на $t_{\beta} \approx 4,0d$. Минимум сопротивления приходится на $t_{\beta} \approx 5,0d$, $1,0d$ и $3,0d$ для насадок круглого, квадратного сечений и пластинчатой формы, соответственно.

Сопоставление опытных данных по гидравлическому сопротивлению слоя насадки при коридорном и шахматном размещении насадочных тел пластинчатой формы показывает, что при шахматном расположении однопер-иодный режим одновременного вихреобразования отсутствует (кривая 4, рис.2). Это связано с тем, что при шахматном расположении элементов происходит взаимодействие вихрей, образованных на

соседних струнах, т.е. шагом, обеспечивающим реализацию режима одновременного вихреобразования, является расстояние по вертикали между близлежащими элементами на соседних струнах, а не на одной струне, как при коридорном расположении.

Анализ схемы взаимодействия несимметрично образующихся вихрей показывает, что в полупериодном режиме призматические тела располагаются на таком расстоянии, чтобы обеспечить совпадение времени пробега вихрей за нижерасположенным телом, т.е. взаимодействие вихря $1'$ осуществляется в момент завершения образования вихря $2''$, а вихря $1''$ - с вихрем $2'''$, образующимся за вихрем $2''$, после чего процесс вновь повторяется (рис.3 а). Совпадение времени образования и движения вихрей приводит к увеличению их суммарной мощности, позволяющей совершать большую работу.

Аналогичная картина наблюдается и в однопериодном режиме (рис. 3 б), однако отличием является то, что вихрь $1'$, оторвавшийся от впереди стоящего тела, взаимодействует с вихрем $2'''$ в момент завершения его формирования, т.е. за время пробега вихря 1 до расположенного ниже по потоку элемента за последним образуется поочередно с противоположных сторон два вихря.

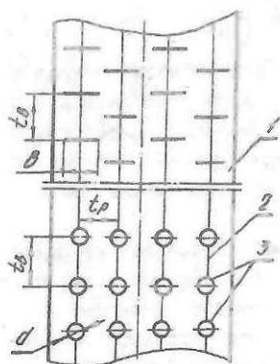


Рис. 1. Аппарат с регулярно размещенными насадочными телами; 1 - корпус; 2 - струны; 3 - насадочные тела.

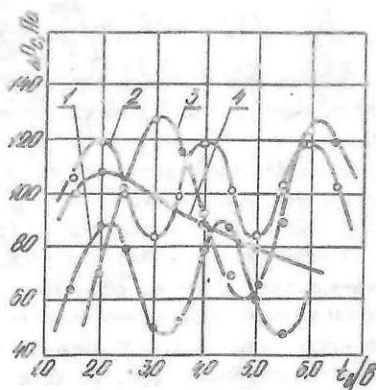
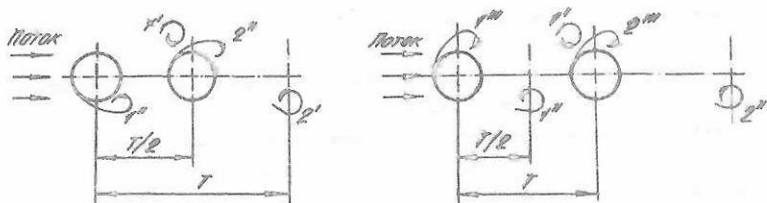


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления сухого аппарата ΔP_0 от безразмерного вертикального шага t_p/B : $t_0/B = 1,8$; 1 - тела круглого сечения; 2, 4 - тела пластинчатой формы; 3 - тела квадратного сечения; 1, 2, 3 - коридорное расположение тел; 4 - шахматное расположение тел.



а) полупериодный режим

б) однопериодный режим

Рис. 3. Схема взаимодействия несимметрично образующихся вихрей

Для определения степени взаимодействия вихрей введено понятие величины сдвига в моментах их образования θ_0 , характеризующей влияние вертикального шага размещения насадочных тел, определяемой по формулам:

для насадок круглого и квадратного поперечного сечения

$$\theta_0 = 0,75 + 0,25 \operatorname{Sin} \left[\frac{\pi}{2} \left(4 \frac{Sl}{0,43} \frac{t_0}{b} + 1 \right) \right], \quad (1)$$

для насадок пластинчатой формы

$$\theta_0 = 0,85 + 0,15 \operatorname{Sin} \left[\frac{\pi}{2} \left(4 \frac{Sl}{0,3} \frac{t_0}{b} + 1 \right) \right]. \quad (2)$$

Непрерывным условием одновременного (синфазного) режима в работе насадочных тел является $\theta_0 = 1$, которое достигается в полупериодном и однопериодном режимах одновременного вихреобразования.

Исследованиями установлено, что сопротивление слоя насадки с увеличением радиального шага t_p между насадочными телами от $1,5b$ до $2,0b$ резко падает (рис. 4).

В этом диапазоне частоту срыва вихрей определяет не размер обтекаемых тел, а зазор, образованный двумя соседними элементами, и чем он меньше, тем больше частота срыва энергосодержащих вихрей. Это объясняется тем, что уменьшение t_p способствует интенсивному росту количества вихрей, который приводит к большим затратам энергии газового потока при прохождении насадочной зоны аппарата.

При $t_p > 2,0b$ газовый поток обтекает насадочные тела как одиночные элементы, независимые друг от друга, а вихри, образованные у соседних тел, не взаимодействуют друг с другом и, следовательно, потребление энергии незначительное.

Снижение γ : завлического сопротивления при этом происходит

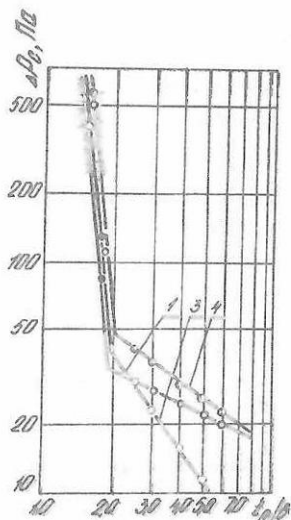


Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления сухого аппарата от безразмерного радиального шага между телами t_p/b . Обозначение кривых см. рис. 2.

где $\epsilon_0 = (1 - \delta\delta/t_p^2)$ - порозность ряда (ячейки) насадки; $\epsilon_{кр}$ - порозность ряда насадки при $t_p^{кр}$.

Для расчета гидравлического сопротивления сухого аппарата представим слой насадки из регулярно размещенных тел как систему, состоящую из рядов (ячеек) $n = H/t_b$ со свободным сечением, равным порозности ряда насадочных тел ϵ_0 :

$$\Delta P_c = \zeta_c \frac{\rho_r W_r^2}{2 \cdot \epsilon_0} \frac{H}{t_b} \quad (4)$$

Обработка экспериментальных данных показала, что коэффициент сопротивления сухой насадки ζ_c не является постоянной величиной, а зависит от механизма взаимодействия вихрей в вертикальном и радиальном направлениях:

$$\zeta_c = A \cdot \theta_\delta \theta_p \quad (5)$$

пропорционально росту порозности насадочных элементов. Такая же закономерность получена при шахматном расположении насадочных тел.

Таким образом, масштаб вихрей и их частота срыва зависят при $t_p < 2,0\delta$ от зазора между насадочными элементами, а при $t_p > 2,0\delta$ от поперечного размера обтекаемых тел. Эта закономерность наблюдалась для всех исследованных типов насадки. Поэтому в качестве критического радиального шага, разделяющего два режима образования, срыва и взаимодействия вихрей, принят $t_p^{кр} = 2,0\delta$.

Степень взаимного влияния насадочных элементов в радиальном направлении учитывается коэффициентом θ_p :

$$\theta_p = \frac{\epsilon_{кр}}{\epsilon_0} \quad (3)$$

Здесь A - коэффициент, равный 0,45, 0,66 и 0,6 для насадочных тел круглого, квадратного сечений и пластинчатой формы, соответственно.

Глава 2. Гидродинамические закономерности обтекания регулярно расположенных насадочных тел. Двухфазный поток.

На основе сопоставительного исследования обтекания призматических насадочных тел круглого, квадратного сечения и пластинчатой формы двухфазным потоком выявлены четыре характерных для аппаратов с регулярной насадкой режимы: пленочный, переходный, режим развитой турбулентности и интенсивного брызгоуноса. Из них наиболее предпочтительным для проведения массообменных процессов является режим развитой турбулентности ($W_r = 3,0+4,5$ м/с), характеризующийся высокими значениями количества удерживаемой аппаратом жидкости (КУЖ) и развитой поверхностью контакта фаз.

Анализ результатов исследований гидродинамических режимов работы аппарата с регулярно размещенными телами пластинчатой формы, визуальных наблюдений и фотосъемки при малых и больших нагрузках по жидкости (до $250 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$) позволил обнаружить узкую переходную область плотностей орошения ($90 < L < 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$), разграничивающую области малых и больших нагрузок по жидкости. Эти области отличаются качественно различной структурой взаимодействующих потоков. На рис. 5 представлена зависимость ΔP от плотности орошения при различных вертикальных шагах, имеющая скачкообразное изменение характера при переходе от одной области плотностей орошения к другой. В области малых плотностей орошения ($L < 90 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$) газожидкостный слой состоит из тонких пленок жидкости на поверхности насадочных тел и капель, вовлекаемых в вихревое движение газовым потоком. При больших плотностях орошения ($L > 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$) структура газожидкостного слоя имеет качественные отличия: жидкость стекает с пластин в виде струй, дробящихся затем на капли; на пластине образуется аврированный слой жидкости; струйки и капли жидкости вовлекаются в вихревое движение, образуя газожидкостные зихри. В переходной области (указанной пунктирными линиями) наблюдается пульсационный характер изменения гидравлического сопротивления вследствие периодического накопления и провала жидкости в слое насадки, отличающийся неустойчивостью взаимодействия фаз.

Данные экспериментальных исследований показывают, что с рос -

том плотности орошения гидравлическое сопротивление орошаемого аппарата ΔP_2 и КЭЖ k_0 увеличиваются. При этом расстояние между телами в вертикальном направлении t_0 , соответствующее режиму одновременного вихреобразования, заметно увеличивается, т.е. сдвигается в сторону больших значений (рис.6). Зависимость гидравлического сопротивления от вертикального шага подтверждает то, что два пика изменения гидравлического сопротивления характерны для коридорного расположения элементов, а при шахматном расположении ΔP_2 имеет один максимум, соответствующий полупериодному режиму однофазного вихреобразования (кривая 4, рис.6). Величина гидравлического сопротивления орошаемого аппарата в однофазном режиме (второй максимум), в отличие от сухого аппарата, несколько ниже, чем в полупериодном режиме. Это объясняется тем, что в двухфазном потоке интенсивность диссипации энергии вихрей тем выше, чем больше длина пробега до взаимодействия, т.е. до следующего источника вихреобразования - насадочного элемента. Такое явление характерно для всех типов испытанных насадочных тел.

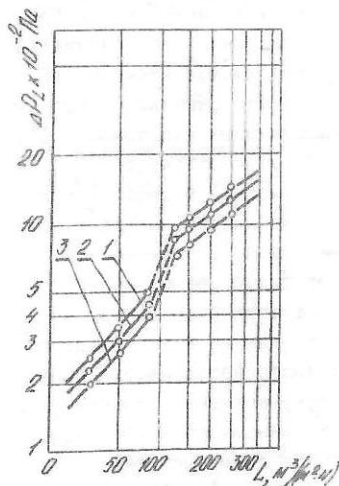


Рис. 5. Зависимость гидравлического сопротивления аппарата ΔP_2 от плотности орошения L : $W_r = 4$ м/с; $t_0/B = 1,8$; 1, 2, 3 - $t_0/B = 2,0$; 3, 0 и 4, 0, соответственно.

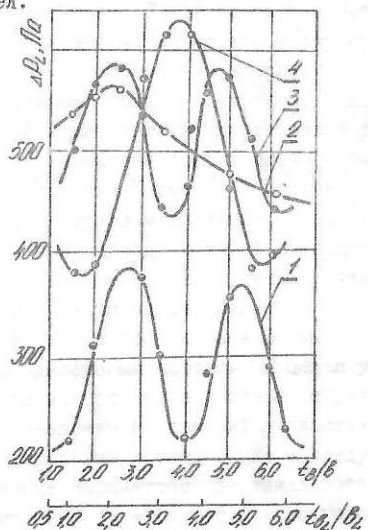


Рис. 6. Зависимость гидравлического сопротивления аппарата ΔP_2 от безразмерного вертикального шага t_0/B ; $W_r = 4$ м/с; $L = 90$ м³/(м²·с); 1 - тела круглого сечения; 2, 3 - тела пластинчатой формы; 4 - тела квадратного сечения.

Сдвиг вертикального шага с увеличением плотности орошения наблюдается практически во всем диапазоне изменения скоростей газа и для всех типов исследованных насадочных элементов. Объяснение этого явления лежит в механизме образования вихрей. При увеличении плотности орошения газовый поток обтекает насадочные тела с присоединенной частью жидкости, т.е. размер обтекаемого тела больше, чем ее геометрический размер. Увеличение размера обтекаемого тела (названного нами "эффективной" шириной $b_{\text{э}}$) при неизменной скорости газового потока приводит к возрастанию периода образования вихрей, а следовательно, и времени их пробега до следующего в вертикальном направлении тела. Естественно, что увеличивается и расстояние, при котором наступают режимы одновременного вихреобразования.

Экспериментально установлено, что вертикальные шаги размещения насадочных тел, соответствующие полупериодному и однопериодному режимам одновременного вихреобразования в однофазном и двухфазном потоках различаются. Однако соотношения между шагом и шириной тела для однофазного и двухфазного потоков с поправкой на "эффективную" ширину насадочных элементов $b_{\text{э}}$ равны. Так, например, при обтекании пластин газовым потоком $t_{\text{с}}/b = 2,0$ и $t_{\text{с}}/b_{\text{э}} = 4,0$ в полупериодном и однопериодном режимах, соответственно (рис. 2). При наличии жидкой фазы эти соотношения составляют $t_{\text{с}}/b_{\text{э}} = 2,0$ и $t_{\text{с}}/b_{\text{э}} = 4,0$ (рис. 6).

Исходя из принятого характера обтекания насадочных элементов двухфазным потоком, а также на основании визуальных наблюдений и анализа фотоснимков, предложены уравнения для расчета порозности ряда насадочных элементов:

$$\varepsilon_{\text{э}} = \varepsilon_0 \left[1 - 2\delta_{\text{пл}} \frac{b}{t_{\text{с}}^2 \varepsilon_0} - \frac{U_{\text{пл}}(b + \delta_{\text{пл}})(l + 2\delta_{\text{пл}})}{Sl \cdot W_{\text{г}} \cdot t_{\text{с}}^2} \right] \quad (6)$$

и "эффективной" ширины насадочных тел:

$$b_{\text{э}} = b \left[1 + \frac{2\delta_{\text{пл}}}{l} + \frac{U_{\text{пл}} \varepsilon_0}{Sl \cdot W_{\text{г}}} \frac{(b + \delta_{\text{пл}})(l + 2\delta_{\text{пл}})}{b \cdot l} \right]^{1/2} \quad (7)$$

где $U_{\text{пл}} = \sqrt{\delta_{\text{пл}} g}$ - скорость стекания пленки с насадочных тел.

Толщину пленки жидкости на насадочных элементах определим по аналогии с водосливами:

— для насадок круглого сечения

$$\delta_{\text{пл}} = 1,35 \left[\frac{d_4 l_4 W_{\text{ж}}}{\mu \sqrt{g} (l_4 + \pi d_4)} \right]^{2/3}; \quad (8)$$

— для насадок квадратного сечения и пластинчатой формы

$$\sigma_{\text{пл}} = \left[\frac{\delta \cdot l \cdot W_{\text{ж}}}{\mu \sqrt{g} (l + 2\delta)} \right]^{2/3} \quad (9)$$

где $\mu = 0,34$ — коэффициент расхода для водослива с широким порогом.

Адекватность вычисленных значений толщины пленки по (8) и (9) оценивали статистической обработкой фотоснимков специальных экспериментов, полученных методом "лазерного ножа". Погрешность уравнений (8) и (9) составляет $\pm 24\%$.

Наличие орошения при изменении радиального шага t_p расположения элементов от $1,5 \delta_{\frac{1}{2}}$ до $6,0 \delta_{\frac{1}{2}}$ приводит к повышению гидравлического сопротивления для всех типов испытанных насадок по сравнению с сухим аппаратом, не изменяя характера зависимости в целом. Это значит, что наличие жидкой фазы практически не влияет на частоту срыва вихрей.

Увеличение ширины насадочного тела δ при постоянной порозности не влияет на гидравлическое сопротивление сухого аппарата. Для орошаемого аппарата $\Delta \rho_{\frac{1}{2}}$ с увеличением δ повышалось, что связано с ростом КЖ. При этом возрастает количество жидкости, стекаемой с элементов, а следовательно, уменьшается порозность ряда насадки. Все это является причиной повышения гидравлического сопротивления орошаемого аппарата при одинаковом количестве рядов насадочных тел.

Выявленные особенности влияния нагрузки по жидкости на $\Delta \rho_{\frac{1}{2}}$ характерны и для величины количества удерживаемой аппаратом жидкости h_0 .

Учитывая влияние нагрузки по жидкости на h_0 и предполагая равномерное распределение жидкости в объеме контактной зоны аппарата, для расчета количества удерживаемой жидкости предложена зависимость:

$$h_0 = (h_{\text{пл}} + h_{\text{к}}) \frac{H}{t_p} \quad (10)$$

Членовная составляющая КЖ $h_{\text{пл}}$ рассчитывается по формуле:

$$h_{\text{пл}} = \sigma_{\text{пл}} \frac{\delta \cdot l}{t_p^2} \quad (11)$$

Для расчета капельной составляющей КЖ $h_{\text{к}}$ в объеме одной ячейки (ряда) насадки получено уравнение:

$$k_k = B_k \zeta_{\rho L} \frac{\rho_r W_r^2}{2g\rho_k} \frac{(3-\varepsilon_0)(1-\varepsilon_0)^2}{2\varepsilon_0^2}, \quad (12)$$

где $B_k = 1,35$, $1,5$ и $1,45$ для насадочных тел круглого, квадратного сечений и пластинчатой формы, соответственно.

Погрешность определения капельной составляющей КЖ k_k по уравнению (12) не превышала $\pm 12\%$.

Расчет газосодержания слоя производится по соотношению:

$$\varphi = \left(\varepsilon - \frac{h_0}{H} \right), \quad (13)$$

в котором $\varepsilon = 1 - (V_0/t_b^2 \rho_p^2)$ - объемная порозность насадки; V_0 - объем единичных насадочных элементов.

Для орошаемых насадочных тел коэффициенты θ_{bL} и θ_{pL} , характеризующие степень взаимодействия вихрей в вертикальном и радиальном направлениях, могут быть определены по уравнениям (1) и (2) с заменой t_b/b на t_{bL}/b_L .

Для расчета коэффициента сопротивления орошаемой насадки, по аналогии с (5), на основании обработки экспериментальных данных гидравлического сопротивления получено уравнение:

$$\zeta_{\rho L} = B_L \theta_{bL} \theta_{pL}, \quad (14)$$

в котором $B_L = 0,5$, $0,72$ и $0,66$ при низких плотностях орошения ($\Delta < 90 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) и $B_L = 0,88$, $1,02$ и $0,95$ при высоких плотностях орошения ($\Delta > 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) для насадочных тел круглого, квадратного сечений и пластинчатой формы, соответственно.

Анализ кривых изменения гидравлического сопротивления от скорости газа в аппарате с регулярной насадкой в однофазном и двухфазном потоках показывает, что они почти параллельны. Это означает, что гидравлическое сопротивление орошаемого аппарата $\Delta \rho_L$ в большей степени определяется порозностью ряда насадки. Учитывая такую особенность, предложено уравнение для определения $\Delta \rho_L$:

$$\Delta \rho_L = \zeta_{\rho L} \frac{\rho_r W_r^2}{2 \cdot \varepsilon_L^2} \frac{H}{t_b} \quad (15)$$

Сопоставление экспериментальных данных с расчетом по уравнению (15) показали, что уравнение (15) аппроксимирует экспериментальные данные с погрешностью не более $\pm 14\%$.

Глава 3. Массообмен в аппаратах с регулярно размещенными насадочными телами.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что интенсивность массопереноса как в газовой, так и жидкой фазах растет с увеличением скорости газового потока и плотности орошения. Наиболее эффективна работа аппаратов с регулярной насадкой в режиме развитой турбулентности ($W_r = 3,0 \div 4,5$ м/с). С увеличением плотности орошения коэффициенты массоотдачи в газовой β_{rS} и жидкой β_{mS} фазах, отнесенные к площади поперечного сечения аппарата, при $\angle < 90$ м³/(м²·ч) растут более значительно, чем при $\angle > 120$ м³/(м²·ч), что связано с качественным различием характера взаимодействия фаз в областях малых и высоких плотностей орошения.

На процесс массопереноса значительное влияние оказывает взаимное пространственное расположение насадочных элементов. Анализ зависимости $\beta_{rS} \sim f(t_g)$ и $\beta_{mS} \sim f(t_g)$ (рис. 7) свидетельствует об аналогичном характере изменения с зависимостью $\beta_{rS} \sim f(t_g)$ (рис. 6). Максимальные значения коэффициентов β_{rS} и β_{mS} соответствуют режимам одновременного вихреобразования. Эффективное использование энергии вихрей в этих режимах способствует интенсивному развитию межфазной поверхности за счет многократного дробления струй и капель. Рост плотности орошения приводит к увеличению "эффективной" ширины насадочных тел. Так как процесс вихреобразования зависит от характерного размера (ширины) обтекаемых тел, то максимумы коэффициентов массоотдачи β_{rS} и β_{mS} сдвигаются в сторону больших значений вертикальных шагов между элементами.

Влияние радиального шага на гидродинамические параметры и коэффициенты массоотдачи аналогичное.

Сопоставительные исследования массоотдачи в газовой фазе в slots с насадочными телами различного поперечного сечения показали, что полупериодный и однопериодный режимы одновременного вихреобразования характерны для коридорного расположения насадочных тел. Максимумы значений β_{rS} достигаются как и гидравлическое сопротивление аппаратов и количество удерживаемой жидкости при $t_g = 2,75$ в, 3,85 в и 2,0 в в полупериодном и $t_g = 5,5$ в, 1,7 в и 5,0 в однопериодном режимах (при $\angle < 90$ м³/(м²·ч)) для насадочных тел круглого, квадратного сечений и пластинчатой формы, соответственно. По интенсивности массообмена насадочные тела располагаются в следующей последовательности (по увеличению значения β_{rS}): тела

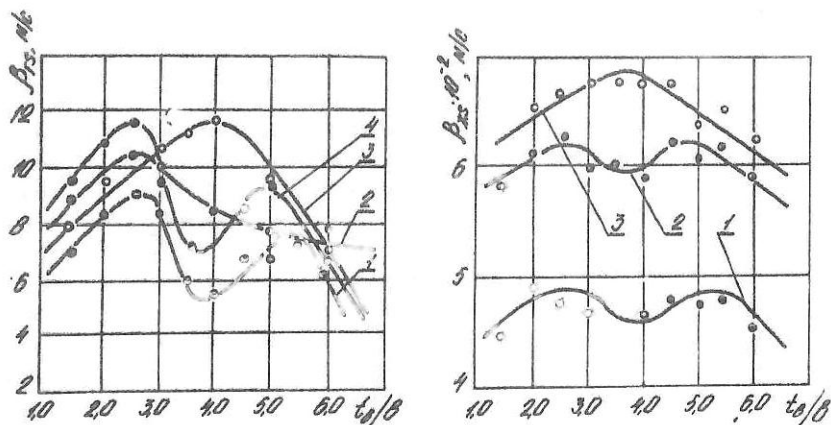


Рис. 7. Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой β_{rs} и жидкой β_{xs} фазах от безразмерного вертикального шага t_g/B : $W_r = 4$ м/с; $L = 90$ м³/(м²·ч); $t_p/B = 1,8$; 1 - тела круглого сечения; 2, 4 - тела пластинчатой формы; 3 - тела квадратного сечения.

круглого сечения, пластинчатой формы и квадратного сечения.

анализ зависимостей $\beta_{rs} \sim f(t_g)$ и $\beta_{xs} \sim f(t_g)$ показал, что в однопериодном режиме (второй максимум на кривых), аналогично изменению гидравлического сопротивления орошаемого аппарата, величина пика несколько ниже, чем в полупериодном. Это объясняется тем, что в однопериодном режиме диссипации энергии вихрей происходит в большей степени за счет прохождения большего пути от элемента к элементу.

Ламонт (1966, 1970) утверждает, что массоперенос осуществляется, главным образом, благодаря перемешиванию внутри крупных вихрей небольших вихрей (колмогоровского микромасштаба), которые движутся к поверхности, отражаются ею и возвращаются в ядро потока. Поэтому мерой интенсивности процесса массообмена может быть глубина проникновения завихренности в пограничную зону.

Рассмотрение механизма отрыва пограничного слоя на примере обтекания потоком жидкости цилиндра (Бэтчелор, 1973) и анализ фотографий обтекания круглого цилиндра показывает, что при этом происходит возникновение периодических ассиметричных колебаний жидкости, и следовательно, в пограничном слое возникает завихренность.

Исходя из этого для глубины проникновения завихренности, являющейся мерой толщины колеблющегося пограничного слоя, получено выражение

$$\delta_{п.з} \approx (\nu/\omega)^{1/2} \quad (16)$$

Как показано ранее, аппараты с регулярно размещенной насадкой представляют собой систему обтекаемых насадочных тел различных форм, регулярно расположенных в объеме аппарата. Вследствие этого при взаимодействии в нем газового и жидкостного потоков генерируется пульсационное (колебательное) движение всего газожидкостного слоя. Вихри, образующиеся в результате отрывного обтекания насадочных тел, значительно отличаются как по масштабам, так и по частоте. При этом энергия основного потока диссипируется по механизму каскадного переноса энергии (Фрост, Моулден, 1980): от пульсации с большими масштабами L , соизмеримыми с размерами насадочных элементов и ячеек (рядов), энергия передается во все меньшие масштабы, пока не диссипируется в пульсации с масштабом l_0 , при которых размеры порождаемых вихрей станут столь малыми, что они почти немедленно будут исчезать под действием вязкости. Этот масштаб пульсации, называемый внутренним масштабом турбулентности или колмогоровским микромасштабом, определяется по выражению:

$$l_0 = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4} \quad (17)$$

При этом пульсации масштабом l , ответственные за генерирование колебательного движения, определяются условием:

$$L \gg l \gg l_0 \quad (18)$$

В колеблющихся потоках условием безвихревого течения жидкости (Бэтчелор, 1973) является:

$$\delta_{п.з} \ll l \quad (19)$$

Исходя из анализа условий (18) и (19) можно сделать вывод, что для колеблющегося пограничного слоя на свободной поверхности примерно $\delta_{п.з} \approx l_0$. Это также подтверждается проведенными нами оценками. Эксперименты, проведенные с использованием метода "лазерного ножа" показали, что действительно, при скорости газа в аппарате $W_r = 4$ м/с и плотности орошения $L = 25$ м³/(м²·ч) средний размер капли $d_n \approx 2 \cdot 10^{-3}$ м, тогда как по уравнениям (16) и (17) имеем $\delta_{п.з} \approx 2,1 \cdot 10^{-4}$ м и $l_0 \approx 2,2 \cdot 10^{-4}$ м. Такие приблизительно

равные значения $\delta_{r,3}$ и l_0 характерны для всех диапазонов изменения режимных и конструктивных параметров аппаратов. В соответствии с изложенным из совместного решения уравнений (16) и (17) получим частоту колебания свободной поверхности раздела:

$$\omega = (\mathcal{E}/\nu)^{1/2} \quad (20)$$

Отмечено (Бэтчелор, 1973), что завихренность жидкостного потока возрастает при растяжении его в направлении вихревой линии и указывается на возможность увеличения (усиления) суммарной завихренности в некотором объеме жидкости. Усиление (интенсификация) завихренности при растяжении вихревой линии (Фрост, Шоулден, 1980) приводит к увеличению скорости диссипации энергии турбулентности по сравнению с ламинарным течением, что составляет основу колмогоровской теории турбулентности. Следовательно:

$$\mathcal{E} = \nu \omega^2 \quad (21)$$

Решая уравнение (21) относительно ω получим выражение, аналогичное (20).

Основываясь на первом законе Фика для процессов массоотдачи, принимая в нем $\Delta Z \approx \delta_{r,3}$ по (16) и представляя рабочую зону аппарата, состоящей из нескольких ячеек (рядов) насадочных элементов, получено уравнение для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе:

$$\beta_{r,s} = B_r \left(C_k \frac{h_k}{(t_B - t_{m1}) \psi_{34}} \right)^{1/4} \cdot \frac{U_r^{3/4} D_r^{1/2}}{d_k^{1/4} \nu^{1/4}} N_{24} \quad (22)$$

Здесь B_r - коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем; N_{24} - количество ячеек (рядов) в рабочей зоне аппарата.

Визуальные наблюдения за структурой потоков в слое регулярно размещенной насадки из различных типов насадочных элементов, в частности, в слое пластинчатой насадки, и статистическая обработка фотоснимков позволили представить следующий механизм преимущественного образования капель при малых плотностях орошения. Жидкость стекает по поверхности пластин в виде пленки. С кромки пластины, противоположной стороне формирования вихря, пленка жидкости стекает с образованием пленок. Поочередный срыв вихрей приводит к дроблению пленок на капли. При высоких плотностях орошения ($\Delta > 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) с грани пластины, противоположной стороне формирования вихря, пленка жидкости стекает с образованием струек. Попеременный срыв вихрей приводит к дроблению струек на капли.

С учетом данного механизма образования капель и условия сохранения сферической формы капли в момент образования, получены уравнения для расчета среднего диаметра капель при малых плотностях орошения

$$d_k = B_1 \frac{\sigma^{0.6} \sigma_{пл}^{-0.4}}{\zeta_{пл}^{0.4} \rho_M^{0.2} \rho_r^{0.4} U_r^{1.2}} \quad (23)$$

и при высоких плотностях орошения:

$$d_k = B_2 \frac{\sigma^{0.4} \sigma_{пл}^{-0.6} \rho_M^{0.4}}{\zeta_{пл}^{0.2} \rho_r^{0.4} U_r^{0.8}} \quad (24)$$

Точность зависимостей (23) и (24) оценивали статистической обработкой фотографий, полученных методом "лазерного ножа". В результате обработки экспериментальных данных получено значение коэффициента $B_1 = 6,0$ в уравнении (23) для всех испытанных типов насадочных элементов и $B_2 = 0,8; 0,7$ и $0,65$ в уравнении (24), соответственно, для насадочных тел круглого, квадратного сечений и пластинчатой формы.

Обработкой экспериментальных данных получено, что значения коэффициента B_2 в уравнении (22) составляют 4,3; 4,85 и 4,65 для насадочных тел круглого, квадратного сечений и пластинчатой формы, соответственно.

Точность расчетных значений по уравнению (22) с учетом (23) и (24) составила $\pm 1\%$.

Хигби (1935), исходя из модели обновления поверхности, приняв время контакта постоянным для всех элементов поверхности, получил уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в жидкой фазе в следующем виде:

$$\beta_M = 2 \sqrt{\frac{D_M}{\pi \Delta t}} \quad (25)$$

С учетом того, что вихрь не является волной, а подобен волновому пакету, и турбулентное движение среды представляет собой набор многих волновых пакетов (Фрост, Моулден, 1980), и из рассмотренного механизма образования вихрей за плохообтекаемыми телами следует, что размер образующихся вихрей приблизительно определяется доминирующей длиной волны его движения. Тогда, можно принять временной эквивалент длины волны короткого волнового пакета, который содержит лишь один период, равным:

$$\Delta t = T, \quad (26)$$

где T - период образования вихря, определяемый равенством

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (27)$$

Тогда из выражений (16), (26) и (27) имеем:

$$\Delta z^2 = 2\pi \left(\frac{\nu}{\omega}\right)^{1/2} \quad (28)$$

Из уравнения (25) с учетом (28), получим

$$\beta_{ж} = 0,45 \frac{\nu^{1/4} D_{ж}^{1/2}}{\nu^{1/4}} \quad (29)$$

Как видно из (29), решение задачи сводится к определению скорости диссипации кинетической энергии вихрями как величины, характеризующей турбулентную диффузию.

Определив скорость диссипации энергии вихрями, образующимися при обтекании насадочных элементов, с учетом того, что рабочая зона аппарата с регулярной насадкой является совокупностью отдельных ячеек, получено уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в жидкой фазе:

$$\beta_{ж,с} = \beta_{ж} \left[\frac{(1-\varepsilon_1)}{(1-\varepsilon_2)} \right]^{1/4} \frac{U_c^{3/4} D_{ж}^{1/2} \rho_f^{1/4}}{\nu_{ж}^{1/4} \rho_g^{1/4} P_{ж}^{1/4}} K_{24}, \quad (30)$$

где $\beta_{ж}$ - коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем.

Обработкой экспериментальных данных получены значения коэффициента в уравнении (30): $\beta_{ж} = 1,8; 2,2$ и $2,1$ при малых плотностях орошения и $\beta_{ж} = 2,0; 2,35$ и $2,15$ при высоких плотностях орошения для насадочных тел круглого, квадратного сечений и пластинчатой формы, соответственно. Максимальное расхождение между расчетными (по уравнению (30)) и экспериментальными данными не превышало $\pm 19\%$. Это величина характерна для режимов с повышенными скоростями газового потока и высокими плотностями орошения. При снижении нагрузок погрешность составляет $\pm 16\%$.

Для оценки точности уравнений (23) и (24) было проведено также измерение удельной поверхности контакта фаз в аппарате с насадочными телами круглого поперечного сечения.

Анализ полученных результатов показал, что при плотностях орошения $L < 50 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ скорость газа не оказывает существенного влияния на поверхность контакта фаз вплоть до скоростей газа, близких $2,5-3,0 \text{ м/с}$ (начало режима развитой турбулентности). В этих режимах поверхность контакта фаз находится в пределах $100-150$

$\frac{m^2}{m^3}$, При скоростях более 3,5 м/с и плотности орошения $L \approx 70$
 $\frac{m^3}{(m^2 \cdot ч)}$ происходит накопление жидкости в газожидкостном слое
(увеличивается количество удерживаемой жидкости, а следовательно,
снижается газосодержание слоя) и, вследствие чего, резко увели-
чивается поверхность контакта фаз, достигая величины 350+500 $\frac{m^2}{m^3}$.

С учетом выявленного механизма взаимодействия вихрей массооб-
менный аппарат представлен как последовательность участков с сос-
редоточенными параметрами. Места, где расположены насадочные эле-
менты, являются источниками образования вихрей. При своем движении
вихри циркулируют, за счет чего происходит перемешивание как по
газовой, так и жидкой фазам. Кроме того, захватываемая потоком
часть капель уносится на верхний слой насадки. Поэтому каждый
участок с элементами насадки эквивалентен, по нашему предположе-
нию, ступени идеального смешения как по газовой, так и по жидкой
фазам.

На этой основе с учетом заброса вещества в направлении, проти-
воположном движению основной массы жидкости, разработано матема-
тическое описание профиля концентраций абсорбируемого и десорби-
руемого компонентов в газовой и жидкой фазах.

Проверка адекватности математической модели осуществлялась
составлением рассчитанных значений коэффициентов массоотдачи с
результатами, полученными при промышленных испытаниях процесса
абсорбции фтористого водорода на Джамбулском производственном
объединении "Химпром", лабораторных исследованиях процесса аб-
сорбции сероводорода содовым раствором в присутствии катализа-
тора и опытно-промышленных испытаниях десорбции сероводорода из
пластовой воды Немировского рудника Яворовского производственного
объединения "Сера".

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных
показали хорошую их сходимость ($\pm 12\%$).

Глава 4. Опыт промышленной эксплуатации и внедрение аппаратов с регулярно размещенными насадочными телами

В работе представлены результаты промышленных испытаний и
внедрения аппаратов с регулярной насадкой на Джамбулском произ-
водственном объединении "Химпром", Чимкентском производственном
объединении "Фосфор" и Актюбинском заводе хромовых соединений, а
также опытно-промышленных испытаний по абсорбции сероводорода,

образующегося при подземной выплавке и переработке серы на ряде рудняков и производственных объединений Львовской области.

Опыт эксплуатации аппаратов с регулярно размещенными насадочными телами подтвердил высокую их эффективность в процессах абсорбции и десорбции газов (92-98,8%), очистки газов от пыли (97+99,2%); интенсивность и надежность в работе по сравнению с известными конструкциями насадочных и тарельчатых аппаратов, механических абсорберов и полых скрубберов, а также незабиваемость внутренних устройств слипающимися и кристаллизующимися твердыми веществами в сочетании с возможностью получения густых шламов и концентрированных растворов; низкое гидравлическое сопротивление аппаратов - 300+600 Па и низкую металлоемкость - для насадок пластинчатой формы, круглого и квадратного поперечного сечений - 14,40 и 34 кг/м³, соответственно. Для сравнения заметим, что металлоемкость кольцевых насадок составляет 300-930 кг/м³, регулярных блочных насадок - 90 кг/м³.

На основании опыта промышленного освоения аппаратов с регулярной насадкой на вышеуказанных предприятиях по нашим исходным данным УРАЛГИПРОХИМой разработаны проекты аппаратурно-технологических схем очистки газов для второй очереди производства сернистого натрия и окиси хрома Актюбинского завода хромовых соединений.

Рациональными областями применения аппаратов с регулярной насадкой представляются процессы массообмена и пылеулавливания, а также санитарная и технологическая очистка газоздушных потоков и сточных вод (десорбцией, аэрацией) больших объемов, содержащих твердые примеси. Они также могут успешно применяться для процессов контактного теплообмена и конденсации.

Глава 5. Принципы выбора и расчета режимных и конструктивных параметров аппаратов с регулярно размещенными насадочными телами

Исходя из сопоставительного анализа результатов лабораторных исследований гидродинамики и массообмена, полученных в широком диапазоне изменения скоростей взаимодействующих потоков для различных конструктивных разновидностей аппаратов с регулярной насадкой, а также на основании данных опытно-промышленных, промышленных испытаний и внедрения их в промышленность, определены оптимальные режимные и конструктивные параметры. При этом в качестве

ве критерия оптимизации использованы приведенные затраты.

Для реализации этой задачи была разработана блок-схема расчета аппарата с регулярной насадкой, которая содержала модули технологического, экономического расчетов и блока оптимизации с учетом решения математической модели процессов абсорбции и десорбции, а также конкретной принципиальной технологической схемы установки для абсорбции и десорбции.

По разработанному алгоритму составлена программа расчета для ЭВМ "Искра-1030. II" на языке "Бэйсик".

На основании данных реализации программы получены значения оптимальных режимных и конструктивных параметров аппарата с регулярно размещенными насадочными телами, которые положены в основу предлагаемой методики расчета (рекомендации по выбору и расчету) оптимальных режимных и конструктивных параметров аппаратов с регулярно размещенными насадочными телами для проведения массообменных процессов.

По приведенным затратам аппараты с регулярной насадкой в зависимости от формы элементов располагаются в следующей последовательности (по возрастанию): пластинчатой формы, круглого и квадратного сечений.

В результате обработки экспериментальных данных по пылеулавливанию в лабораторных и промышленных условиях с учетом турбулентной диффузии частиц получено уравнение для расчета эффективности (степени) пылеулавливания:

$$\eta = 1 - \exp\left[1 - 1,7\left(v_r / D_s\right)^{-0,25}\right] \quad (3I)$$

Здесь D_s - коэффициент турбулентной диффузии частиц в газовом потоке.

Сравнение расчетных значений степени пылеулавливания по уравнению (3I) с экспериментальными данными показало, что погрешность уравнения (3I) составляет $\pm 12\%$.

Исходя из тождественности процессов гидродинамики, массообмена и пылеулавливания на экспериментальных стендах, опытно-промышленных и промышленных аппаратах разработаны рекомендации к проектированию, и методика расчета их гидродинамических и массообменных характеристик, а также эффективности пылеулавливания.

Методика расчета аппаратов с регулярной насадкой используется и используется при расчете и проектировании газоочистного оборудования ОНИИ ГПО "Фосфор", КАЗНИИГИПРОФОСФОРом, ВНИ ИСЕРом и УРАЛГИПРОХИмом

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. В результате проведенного исследования решена крупная народно-хозяйственная проблема - создание новых высокоэффективных газоочистных аппаратов для очистки газов от фосфор-, серу-, фтор- и хромсодержащих соединений, а также от пыли. В основу конструкций этих аппаратов положены установленные в работе новые закономерности отрывных течений.

2. Впервые экспериментально исследованы закономерности взаимодействия вихрей, образующихся при обтекании последовательно и параллельно расположенных элементов насадки различной формы. Установлено существование двух активных режимов вихреобразования, названных полупериодным и однопериодным, характеризующихся максимальными значениями коэффициентов массоотдачи вследствие эффективного взаимодействия вихрей. Выявлены условия, обеспечивающие реализацию этих режимов.

3. Установлено различное влияние удельной нагрузки по жидкости на структуру взаимодействующих потоков в слое регулярной насадки при плотностях орошения до $90 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и более $120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Обнаружены два механизма дробления пленки жидкости: при малых жидкостных нагрузках ($\leq 90 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) образуются капли, а при больших ($> 120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) пленка жидкости вначале распадается на струйки, а затем уже на капли. В переходной области от 90 до $120 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ наблюдается неустойчивый характер взаимодействия фаз, сопровождающийся большими пульсациями давления.

4. Показано, что при расчете перепада давления, количества жидкости, удерживаемой аппаратом, коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах необходимо учитывать "эффективную" ширину насадочных элементов, определяемую с учетом вихревого взаимодействия газа и жидкости.

5. На основании сопоставительного исследования аппаратов с насадочными телами различной формы выявлены режимы идентичного характера взаимодействия фаз, что позволило использовать единый подход к расчету их гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания, коэффициентов массоотдачи в газовой и жидкой фазах, а также эффективности пылеулавливания.

6. На основе модели идеального смешения по газовой и жидкой фазам в ячейке (р-де) насадочных элементов дано математическое описание распределения концентраций абсорбируемого и десорбируе-

мого компонентов по высоте рабочей зоны аппарата.

7. На основе полученных расчетных уравнений и результатов лабораторных, опытно-промышленных, промышленных испытаний и внедрения в промышленность аппаратов с регулярной насадкой для очистки газов и пыли производств фосфора, серы, соединений фосфора, фтора и хрома и минеральных удобрений:

- подтверждена их незабываемость твердыми примесями, низкое гидравлическое сопротивление, возможность работы в широком диапазоне скоростей газа от 2 до 4,5 м/с и плотностей орошения от 25 до 250 м³/м².ч, высокая эффективность вследствие реализации активного гидродинамического режима, включающего вихреобразование, пульсации потока и многократное чередование стадий распыления и сепарации жидкости;
- разработаны методика и алгоритм расчета оптимальных режимных и конструктивных параметров аппаратов с регулярной насадкой с использованием функции приведенных затрат для процессов абсорбции и десорбции;
- выданы исходные данные на проектирование и реконструкцию промышленных установок очистки пластовых вод и газозоудушных выбросов от сероводорода на Гримневском, Загайпольском рудниках подземной выплавки серы, Гаурдакском и Куйбышевском серных заводах с окупаемым экономическим эффектом в сумме 987,5 тыс.руб.

8. Исходя из сравнительного анализа аппаратов с регулярной насадкой и известных конструкций массообменных аппаратов и пылеуловителей, выявлены их простота конструкции и изготовления, а также низкая металлоемкость.

9. Внедрение аппаратов с регулярной насадкой для очистки газов различных производств позволило осуществить ряд мероприятий, предусмотренных Постановлением Совета Министров СССР № 1190 от 30.II.84 г.

10. В результате внедрения аппаратов с регулярной насадкой в производствах фосфора, фтора, хрома и минеральных удобрений достигнуты экономический и экологический эффекты в сумме 3,43 млн. руб.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$b(d)$ - ширина (диаметр) насадочного тела, м; B - коэффициент;
 D - коэффициент диффузии, м²/с; C_x - коэффициент сопротивления

капли; H - высота насадочной зоны, м; h - высота, м; K - коэффициент; L - плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; l - длина насадочного тела, м; t - шаг размещения насадочных тел, м; u - истинная (локальная) скорость, м/с; W - скорость, отнесенная к полному сечению аппарата, м/с; ν - коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; μ - коэффициент расхода; ρ - плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; σ - поверхностное натяжение, Н/м; ω - частота, рад/с; φ - газосодержание, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $Sl = f \cdot b / W$ - число Струхала; f - частота срыва вихрей, с^{-1} .

Индексы: v - вертикальный; $г$ - газовая фаза; $ж$ - жидкая фаза; $к$ - капля; $кр$ - критический; $пл$ - пленка; ρ - радиальный; $с$ - сухой; $яч$ - ячейки; Δ - орошаемый.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ
ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Серманизов С.С. Разработка и исследование аппаратов с учетом закономерностей вихреобразования при нормальном обтекании регулярно размещенных насадочных тел // Создание и внедрение аппаратов с активными гидродинамическими режимами в текстильной промышленности и производстве химических волокон. - М.: ЦИНТИХИМлегпром, 1989. - С. 85-86.
2. Человек-производство-природа /О.С. Балабеков, Я.Ш. Балтабаев, С.С. Серманизов.-Алма-Ата: Кайнар, 1988. - 240 с.
3. Балабеков О.С., Серманизов С.С., Балтабаев Я.Ш. Проблемы экологического мониторинга.-Алма-Ата, 1985. - 198 с. - Деп. в КазНИИТИ 03.10.85, № 929.
4. Серманизов С.С., Сабирханов Д., Холпанов Л.П., Балабеков О.С. Массообменные аппараты с подвижной насадкой для очистки газов и пылеулавливания /Обзорн.инф. - М.: НИИТЭХИМ, 1989, вып.10. - 67 с.
5. Серманизов С.С. Аппараты газоочистки с регулярной насадкой: /Науч.-техн.инф.сб. Серия П. Использование отходов, попутных продуктов в производстве строительных материалов и изделий. Охрана окружающей среды. - М.: ВНИИЭСИ, вып.П, 1986. - С.19-22.
6. Балабеков О.С., Серманизов С.С., Тарат Э.Я. и др. Очистка отходящих газов от вредных примесей в производстве фосфорных удобрений //Охрана природы и природоиспользование в Казахстане. Сб. научн.трудов АН КазССР. - Целиноград, 1976. - С.173-176.
7. Серманизов С.С., Бекибаев Н.С., Лойко В. Расчет гидравлического сопротивления аппарата с регулярной пластинчатой насадкой //Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии. Секция 6. - Сумы, 1986. - С.198-199.
8. Бекибаев Н.С., Серманизов С.С., Мустафина А.И. Энергетический подход к определению количества удерживаемой жидкости в аппарате с регулярной пластинчатой насадкой //Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии. Секция 6. - Сумы, 1986. - С.194-195.
9. Серманизов С.С., Мустафина А.И., Бекибаев Н.С., Поникаров И.И. Особенности гидродинамики в аппарате с регулярно-подвижной насадкой при больших нагрузках по жидкости //Современные машины и аппараты химических производств. Часть 7. - Ташкент, 1983. - С.75-78.

10. Балабеков О.С., Пазыбеков М.С., Серманизов С.С. и др. О некоторых проблемах обезвреживания и утилизации газопылевых выбросов // Проблемы охраны труда. - Кишинев: Штиинца, 1978. - С.284-285.

11. Балабеков О.С., Волненко А.А., Серманизов С.С., Мусин Н.А. Принципиальные основы разработки теплообменного оборудования с учетом закономерностей вихреобразования // Современные машины и аппараты химических производств. Т.2. - Чимкент, 1988. - С.3-6.

12. Серманизов С.С., Мустафина А.И., Искендиоров М.З., Сабырханов Д. Расчет гидравлического сопротивления аппаратов с подвижной насадкой // Современные аппараты для обработки гетерогенных сред. Мехвуз сб. научн. трудов ЛТИ им. Ленсовета. - Л., 1986. - С.63-68.

13. Сабырханов Д., Балабеков О.С., Серманизов С.С. и др. Структура потоков и массообмен в аппаратах с подвижной насадкой // Пути совершенствования, интенсификации и повышения надежности аппаратов в основной химии. Часть I. - Сумы, 1982. - С.195-198.

14. Серманизов С.С., Мейербеков С.Т., Садыкулов Х.С. Расчет коэффициента массоотдачи в жидкой фазе в капельном и пленочном течении жидкости и их совместном течении // Современные машины и аппараты химических производств. Часть 2. - Чимкент, 1988. - С.6-8.

15. *Bala bckow O.S., Maldabekow Sh.M., Sermanisow S.S. Anwendung von strukturell geteilten verzahntem für die Berechnung des Stofftransport geschwindigkeit in Zweiphasen Strömungen. Chem. Techn., 1982, 34, Jg. Heft 4, s. 214-215.*

16. Бекибаев Н.С., Серманизов С.С., Мустафина А.И., Сарбасов А.С. Механизм образования капли в аппарате с регулярной пластинчатой насадкой // Современные машины и аппараты химических производств. Часть 2. - Чимкент, 1988. - С.213-214.

17. Гисматулин Ч.Н., Балабеков О.С., Серманизов С.С. Исследование поверхности контакта фаз на крупнодырчатой тарелке со взвешенной шаровой насадкой // Современные машины и аппараты химических производств. Часть 2. - Чимкент, 1980. - С.462-468.

18. Тарат Э.Я., Серманизов С.С., Балабеков О.С. Исследование поверхности контакта фаз в аппарате с орошаемой взвешенной шаровой насадкой // Изв. вуз. СССР Химия и хим. технология. - 1976. - Т.19, вып.9. - С.1450-1452.

19. Серманизов С.С., Балабеков О.С., Тарат Э.Я. Абсорбция фтористых соединений в аппарате с орошаемой взвешенной шаровой насадкой // Экологическая технология и очистка промышленных выбросов. Мехвуз. сб. научн. трудов. Вып.2. - Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1975. - С.41-44.

20. Балабеков О.С., Серманизов С.С., Тарат Э.Я. и др. Промышленные испытания аппаратов со взвешенной орошаемой насадкой для очистки отходящих газов от фтористых соединений //Химическая промышленность. 1979, №8. - С.483-485.

21. Тарат Э.Я., Балабеков О.С., Серманизов С.С. и др. Исследование абсорбции фтористого водорода и четырехфтористого кремния различными поглотителями в абсорбере с орошаемой взвешенной насадкой //Проблемы охраны природы в производстве фосфора и удобрений. - Л., - С.76-81.

22. Балабеков О.С., Молдабеков Ш.М., Серманизов С.С. и др. О некоторых проблемах очистки выбросов производств фосфора и минеральных удобрений //Реф. сб. "Фосфорная промышленность". вып. I. - М.: НИИТЭХИМ, 1978, - С.24-28.

23. Сабырханов Д., Балабеков О.С., Серманизов С.С. Классификация аппаратов с подвижной насадкой. Чимкент, 1983. - 17 с. - Деп в ОНИИТЭХИМ, Черкассы 25.04.83, № 226.

24. Балабеков О.С., Шакиров Б.С., Серманизов С.С. Очистка отходящих газов при производстве фосфора /Научн.-техн.инф.сб. Серия II. Использование отходов, попутных продуктов в производстве строительных материалов и изделий. Охрана окружающей среды. - М.: ВНИИЭСИ, вып.4, 1979. - С.12-14.

25. Серманизов С.С., Балабеков О.С., Садыкулов Х.С. Разработка и внедрение аппаратов с регулярной насадкой для очистки газов производства триполифосфата натрия //Интенсификация процессов химических производств, Межвуз.сб.научн.трудов. Часть I. - Алма-Ата, 1988. - С.22-25.

26. Серманизов С.С., Садыкулов Х.С. Результаты промышленных испытаний аппаратов с регулярной насадкой в процессе очистки газов производства триполифосфата //Рабочие процессы в теплоэнергетических установках и массообменных аппаратах. Межвуз.сб.научн.трудов.- Алма-Ата, 1988. - С.59-63.

27. Серманизов С.С., Балабеков О.С., Тарат Э.Я., Мухленов И.П. Расчет коэффициентов массоотдачи в газовой фазе в аппаратах со взвешенной орошаемой насадкой //Изв.вузов СССР. Химия и хим.технология. - 1977. - Т.20, вып.1. - С.127-131.

28. Серманизов С.С., Горелов Н.В., Болденко Л.А., Поникаров И.И. Результаты опытно-промышленных испытаний хемосорбера с регулярной насадкой /Химические реакторы (теория, моделирование, расчет). Том 3. - Чимкент, 1983. - С.329-334.

29. Серманизов С.С., Мустафина А.И., Головлев Ю.И., Горшков В. И. Вопросу десорбции сероводорода из сточных вод в аппаратах с регулярной насадкой //Технология неорганических веществ и минеральных удобрений. Т.2. - Чимкент, 1981. - С.491-494.

30. Мустафина А.И., Волненко А.А., Серманизов С.С., Гисматулин Ф.И. Интенсификация процессов массопереноса рациональным расположением пластинчатой насадки //Повышение эффективности и надежности аппаратов в основной химии. Секция 2. - Сумы, 1986. - С.93-94.

31. Мустафина А.И., Серманизов С.С., Волненко А.А., Садыков А.Б. Испытание процесса пылеулавливания в аппарате с регулярной пластинчатой насадкой //Технология сыпучих материалов. Часть 3. - Белгород, 1986. - С.107-108.

32. Шакиров Б.С., Ибрагимов Ж.А., Алексева Е.Я., Серманизов С.С. Очистка газов производства строительных материалов на основе фосфорных шлаков //Пути использования вторичных ресурсов для производства строительных материалов и изделий. - Чимкент, 1986. - С.947-948.

33. Серманизов С.С., Балабеков О.С., Горбунов В.А. и др. О возможности утилизации отходящих газов производства строительных материалов на основе фосфорных шлаков в аппаратах с насадкой. //Пути использования вторичных ресурсов для производства строительных материалов и изделий. Материалы всес.совещ. - Чимкент, 1986. - С. 951-952.

34. Балабеков О.С., Тарат Э.Я., Серманизов С.С. и др. К расчету эффективности пылеулавливателей со внешней орошаемой насадкой //Химическая технология и силикаты. Алма-Ата: Наука, 1974. - С.168-173.

35. Волненко А.А., Серманизов С.С., Петин В.Ф., Горелов Н.В. Массоотдача в газовой фазе в аппарате с регулярной насадкой //Современные машины и аппараты химических производств. Часть 7. - Ташкент, 1983. - С.27-30.

36. Аппарат с насадкой : А.с. 791401 СССР МКИ³ ВОИД 53/20; 47/14; 3/32 /О.С.Балабеков, В.Ф.Петин, С.С.Серманизов и др. (СССР) Б.И., № 48, 1980.

37. Насадка. А.с. 793634 СССР, МКИ ВОИД 53/20 /О.С.Балабеков, Э.Я.Тарат, М.С.Падилбеков, Ш.М.Молдабеков, С.С.Серманизов (СССР) Б.И., № 1, 1981.

38. Насадка для теплообменных аппаратов: А.с. 841656 СССР, МКИ³ ВОИД 53, 20 /В.Ф.Петин, О.С.Балабеков, С.С. Серманизов и др. (СССР) Б.И., № 24, 1981.

39. Теплообменный аппарат: А.с. 1187855 СССР, МКИ⁴ БОИД 55/20 /Д.Сабирханов, С.С.Серманизов, О.С.Балабеков и др. (СССР) Б.И., № 40, 1985.

Серманизов