

ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

На правах рукописи  
УДК 62.- 784.12.433

ГУВАРЬ Валентин Федорович

МОКРАЯ ОЧИСТКА  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ  
АГРЕГАТОВ  
ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

11.00.11 - Охрана окружающей  
среды и рациональное  
использование  
природных ресурсов.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой  
степени доктора технических наук

Макеевка - 1995



Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Донбасской государственной академии  
строительства и архитектуры.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор

Высоцкий С. П.

доктор технических наук,  
профессор

Приходько В. П.

доктор технических наук,  
профессор

Розкин М. Я.

Ведущая организация -- Украинский научный центр технической  
экологии (г. Донецк).

Защита диссертации состоится "30" марта 1995 г.  
в 13.00 час на заседании Специализированного Совета Д-27.01.01  
по присуждению ученой степени доктора технических наук при  
Донбасской государственной академии строительства и архитектуры.

Заверенные отавы в 2-х экземплярах просим прислать по  
адресу: 339023, Донецкая обл., г. Макеевка, ул. Дермавина, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донбасской  
государственной академии строительства и архитектуры.

Автореферат разослан "27" февраля 1995 г.

Ученый секретарь

Специализированного Совета,

доктор технических наук,

профессор

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

В. И. Вратчун

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие строительного комплекса Украины сопряжено со значительными потребностями в строительных материалах, основными из которых являются цемент и стекляные изделия. Последние находят также широкое применение и в других отраслях промышленности и быту. Дальнейшее производство вышеуказанных материалов все острее ставит задачу своевременного осуществления мероприятий по защите атмосферного воздуха от вредных выбросов, наносящих огромный экологический и социальный ущерб. Выбрасываемые в атмосферный воздух пыль и газы, образующиеся при производстве цемента и стекла, оказывают пагубное влияние на живые организмы и растения.

Все в большей мере начинает сказываться старение парка пылеулавливающего оборудования, низкие темпы обновления и оснащения пылегазоулавливающей техникой как вводимых, так и действующих агрегатов, значительно снизились темпы разработок новых высокоэффективных аппаратов.

В цементной промышленности до настоящего времени применялись только сухие способы очистки газов. Технологии удавления и утилизации пыли по сухому способу очистки (электрофильтры, рукавные фильтры, циклоны) практически не решают проблемы предотвращения выбросов в атмосферу вредных газообразных ингредиентов, в первую очередь, оксидов серы и азота, связаны с высокими капитальными затратами на сооружение и большими расходами электроэнергии, что особенно актуально в настоящее время.

Проблема предотвращения загрязнения воздушного бассейна является актуальной и для предприятий, выпускающих изделия из стекла.

Для обеспыливания горячих технологических выбросов теплотехнического оборудования наибольшее распространение на стекольных заводах получили сухие циклоны и мокрые пылеуловители. Однако, технические и эксплуатационные показатели их работы остаются весьма низкими, а эффективность пылеулавливания не отвечает требованиям, предъявляемым к современным системам газоочистки. Это объясняется, прежде всего, несоответствием технических возможностей применяемых аппаратов физико-химическим свойствам улавливаемой пыли.

Одним из эффективных методов очистки газов является улавливание пыли и вредных ингредиентов диспергированными жидкостями (мокрый способ очистки).

Теоретическое обоснование и техническое воплощение в практику различных вариантов мокрой очистки газов дано в работах ряда ученых: Тарата Э.Я.; Мухомова И.П.; Журавлева В.К.; Журавлева В.П.; Ребиндера П.А.; Ужова В.Н.; Вальдберга А.Ю.; Богатых С.А.; Ишука И.П.; Позднякова П.А. и др.

В последние годы успешно ведутся работы по осуществлению процессов мокрого пылеулавливания в режимах развитой свободной турбулентности при больших скоростях газожидкостного потока. Установлено возрастание эффективности использования средств пылеулавливания при переходе систем обеспыливания с пленочными и капельными аппаратами к пенным.

Вместе с тем пенные аппараты, как наиболее экономичные пылеуловители, могут быть с достаточной эффективностью применены для очистки газов с низкой начальной температурой и очень чувствительны к колебаниям расхода газа.

Многочисленными исследованиями установлено, что с повышением температуры газовых выбросов эффективность мокрого пылеулавливания резко уменьшается, чему служат различные объяснения.

В то же время значительным фактором, влияющим на эффективность пылеулавливания, являются теплообменные процессы, протекающие при контакте высокотемпературной пылевой частицы с ассимилирующей жидкостью, которые до настоящего времени изучены недостаточно.

Эффективность мероприятий по охране окружающей среды требует комплексного (системного) подхода к проблеме, не ограничивающегося выбором оптимальных конструкций аппарата непосредственно для очистки газов, а учитывающего целый ряд других факторов, таких как локализация выбросов, подготовка газов к очистке, отвод уловленной пыли и шламов, последующую их утилизацию и утилизацию теплоты отходящих газов.

Возникает необходимость в изучении процесса мокрого пылеулавливания высокотемпературных газов в целом, во всем многообразии основных и сопутствующих явлений. Это позволит применительно к цементному и стекловальному производствам значительно расширить область применения при условии повышения эффективности мокрых способов очистки высокотемпературных газов.

Целью работы является разработка принципиально нового подхода к объяснению механизма взаимодействия высокотемпературного аэрозоля с ассимилирующей жидкостью при мокрой очистке технологических газов, позволяющего энергетически и гидродинамически описать процесс улавливания пыли и определить концепцию схем пылеулавливания с учетом особенностей, характерных для производства строительных материалов.

В соответствии с этими основными задачами настоящей работы заключаются в следующем.

1. Изучить физико-химические свойства пыли, содержащейся в отходящих газах производства стекловатных и цемента, и особенности ее улавливания.

2. Проанализировать современные методы очистки технологических газов стекольного и цементного производств.

3. Разработать и аналитически описать концептуальную модель механизма захвата пылевого аэрозоля из горячего газового потока.

4. Исследовать гидродинамические и теплообменные процессы при обработке высокотемпературных газов в деиных аппаратах.

5. Исследовать и обосновать основные пути совершенствования схем мокрой очистки газов применительно к условиям стекольного и цементного производств.

6. Исследовать реологические свойства сырьевого шлама, приготовленного с добавлением продуктов очистки, и качество получаемого цементного клинкера.

7. Разработать принципиальные схемы промышленного обеспыливания технологических процессов и рекомендации по утилизации уловленной пыли и вторичных энергоресурсов.

8. Осуществить опытно-промышленную проверку результатов исследований и внедрение систем пылеулавливания на предприятиях стекольной и цементной промышленности.

9. Произвести объективную термодинамическую оценку с применением эксергетического метода разработанным способом мокрой очистки высокотемпературных газов стекольного и цементного производств.

На защиту выносятся:

- механо-энергетический подход к описанию механизма взаимодействия высокотемпературного (более  $100^{\circ}\text{C}$ ) пылевого аэрозоля с ассимилирующей жидкостью при мокрой очистке газобразных выбросов огнетехнических агрегатов;

- установленное теоретически и экспериментальным путем

негативное влияние на эффективность пылеулавливания образования вокруг высокотемпературного пылевого аэрозоля паровой рубашки, выражающееся в возникновении реактивной силы, препятствующей захвату частицы жидкостью;

- уравнение, описывающее условие проникновения высокотемпературной пылевой частицы в слой жидкости;

- концепция многостадийности структурных схем мокрой очистки высокотемпературных газов применительно к производству строительных материалов и с учетом утилизации теплоты и уловленной пыли;

- механизм пылеулавливания на различных стадиях газоочистки и уравнения для расчета степени пылеулавливания с учетом рассмотренных механизмов;

- результаты экспериментальных исследований процессов очистки высокотемпературных запыленных газов стекловаренных печей и вращающихся печей обжига цементного клинкера;

- способы обеспечения надежности работы аппаратов при мокрой очистке газов, содержащих пыль, склонную к налипанию;

- комплексность подхода к проблеме очистки газообразных выбросов агрегатов производства строительных материалов с учетом необходимости утилизации теплоты и продуктов улавливания.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- осуществлено научно-обоснованное техническое решение схем мокрой очистки высокотемпературных газообразных выбросов, содержащих пыль, склонную к налипанию, агрегатов промышленности строительных материалов; оно заключается в установлении и экспериментальном доказательстве необходимости ряда стадий, отличающихся тепломассообменными процессами и механизмом извлечения пылевого аэрозоля из обрабатываемых газов;

- выявлен механизм взаимодействия пылевого аэрозоля, нагреваемого до температуры, превышающей значение температуры насыщения

застывающей жидкости, с этой жидкостью:

- предложены модели механизма пылеудаления на различных стадиях газожидкостных режимов;

- получено аналитическое уравнение, описывающее механизм взаимодействия высокотемпературных пылевых частиц с жидкостью;

- определено влияние динамических параметров процесса пенообразования на его режимные характеристики;

- построена обобщенная модель, адекватно описывающая взаимосвязи конструктивных размеров и режимов работы высокотемпературных инерционно-пенных пылеуловителей;

- изучены энергетические характеристики и эффективность пылеудаления в разработанных для условий стекольного и цементного производств схемах мокрой очистки газов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается приведенными в диссертации результатами экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных, полупромышленных и промышленных условиях, полученных с применением современных методов и приборов; соответствием результатов экспериментов теоретическим предположениям; данными промышленного использования разработанных схем пылеудаления.

#### Практическая значимость работы:

- разработано научно-обоснованное аппаратное оформление схем мокрой очистки высокотемпературных газов стекольной и цементной отраслей промышленности, для которых склонна к налипанию;

- создана база для графоаналитического расчета и разработаны основы для конструирования высокотемпературных инерционно-пенных аппаратов производительностью до  $40000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что приемлемо для стекольной промышленности; применение этих пылеуловителей в системах обеспыливания дает возможность обеспечить высокую

эффективность при оптимальных энергозатратах и уменьшении расхода воды;

- определена и обоснована многоступенчатая схема мокрой очистки газов вращающихся печей обжига цементного клинкера, включающая в качестве предварительной стадии распылительный аппарат, характеризующийся малыми капитальными и энергетическими затратами, и стадии тонкой очистки - пенные аппараты;

- разработаны пути обеспечения надежной продолжительной работы систем обеспыливания и использования уловленной пыли и утилизации вторичных энергоресурсов;

- на основе результатов исследований на ряде заводов Украины и России в промышленных условиях внедрены системы очистки высокотемпературных газов.

В работе использована комплексная методика исследования, включающая в себя анализ и обобщение научных результатов, полученных другими авторами; теоретический анализ тепло-массообменных и гидродинамических процессов в аппаратах мокрой очистки высокотемпературных газов; лабораторные, стендовые и промышленные эксперименты по определению закономерностей обеспыливания с планированием экспериментов и последующей математической обработкой результатов расчетов на ЭВМ.

Работа велась по заданию Минстройматериалов СССР в рамках научно-технической проблемы 2.00.035.0П.22.03. "Исследовать возможность очистки высокотемпературных печных газов стекольного производства с утилизацией вторичных энергоресурсов", по заданию Минстройматериалов УССР 3.01.035.014. "Создать и отработать в условиях промышленной эксплуатации новые и усовершенствованные методы и аппараты для защиты воздушного бассейна цементных заводов от загрязнения твердыми частицами" и по заданию ГКНТ

Украины проект 2.03.05./160-93 "Цемент". "Разработать систему очистки технологических газов от твердых и газообразных вредностей для производств с выбросом пыли, склонной к налипанию в газоочистных аппаратах (на примере цементной промышленности)".

Апробация работы: Основное содержание диссертационной работы было представлено в виде докладов и сообщений на международных симпозиумах (г. Донецк, 1983 г.; г. Очаков, 1990 г.; г. Донецк, 1993 г.); на Всесоюзных научно-технических конференциях и семинарах (г. Николаев, 1986 г.; г. Алушта, 1988 г.; г. Москва, 1989 г.; г. Челябинск, 1989 г.; г. Пенза, 1990 г.; г. Донецк, 1991 г.); на Республиканских научно-технических конференциях и совещаниях (г. Харьков, 1986 г.; г. Донецк, 1987 г.; г. Киев, 1986, 1987 и 1988 гг.); на научно-технических конференциях и семинарах Киевского, Днепропетровского и Макеевского инженерно-строительных институтов (г. Киев, 1988 и 1992 г.г.; г. Днепропетровск, 1993 г.; г. Макеевка, 1988, 1990, 1992, 1994 гг.), экспонировалось на Всемирной выставке в г. Пловдив (Народная республика Болгария, 1985 г. - диплом), на ВДНХ СССР (1987 - диплом) и на ВДНХ ССР (1988 г. - диплом).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано две брошюры, 27 статей, получены два авторских свидетельства.

Диссертационная работа выполнена на факультете-кафедре "Теплотехника, теплогоснабжение и вентиляция" Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. В проведении исследований принимали участие сотрудники факультета-кафедры: доценты Сербин В.А., Гушин А.М., Лукьянов А.В., Горожанкин С.А. и старший научный сотрудник Самара А.А., а также сотрудники НПО "Стромэкология ЛТД" (г. Новороссийск) Петрсов В.К., Валоболкин А.Н., Цымбал А.А., Сухнев В.И.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, общих выводов, списка литературы из 218 наименований. Общий объем - 238 страниц основного содержания машинописного текста, 70 рисунков, 43 таблиц и приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Состояние вопроса.

Предприятия промышленности строительных материалов выбрасывают в атмосферный воздух значительное количество вредных веществ, в т.ч. около 58 % твердой неорганической пыли. Основная часть этих выбросов приходится на стекольные и цементные заводы.

Согласно проведенному НИИПОТСТРОМом анализу состояния атмосферноохранной деятельности источником особо интенсивного загрязнения воздушного бассейна пылью на стекольных заводах являются горячие вентиляционные газы теплотехнического оборудования. На их долю приходится более 80 % всех пылевых выбросов в данной подотрасли промышленности строительных материалов.

Пыль, образующаяся при варке стекла, представляет полидисперсную систему с преобладанием частиц размером 5 мкм (около 50 %). В соответствии с известной классификацией эта пыль относится к группе -среднеслипающей (величина слипаемости  $4,36 \cdot 10^2$  Па).

При производстве цемента наиболее сильное пылевыведение наблюдается из вращающихся печей обжига клинкера. В зависимости от свойств сырья, типа печи и режима ее работы вынос материала колеблется в пределах от 3 до 30 % расхода исходных материалов. По результатам исследований НИИОГАЗа пыль, содержащаяся в газах

печей обжига клинкера; относится к IV (сильнослизающей) группе, что в значительной мере определяет эксплуатационную надежность работы пылеуловителей, в частности, полное или частичное забивание аппаратов осажденной пылью.

Согласно литературным данным оснащенность источников горячих газов на предприятиях стекольной промышленности пылеулавливающим оборудованием тонкой очистки не превышает 20 %. В настоящее время очистка высокотемпературных газов от пыли при работе технологического оборудования на стекольных заводах осуществляется преимущественно в сухих циклонах и мокрых пылеуловителях различных конструкций.

Высокая степень слизаемости пыли цементного производства привела к тому, что до последнего времени отходящие дымовые газы обеспыливаются только в электрофильтрах и рукавных фильтрах, а на коротких вращающихся печах обжига клинкера вообще не применяется пылеулавливающая аппаратура.

Учитывая, что практически все пыли, образующиеся при производстве строительных материалов, относятся к среднесмачиваемым и хорошо смачиваемым, многие исследователи считают целесообразным для их улавливания применять мокрые пылеуловители.

Исследования по изучению возможности использования циклонов с мокрой пленкой для очистки от пыли отходящих газов вращающихся печей цементного производства не дали положительных результатов. Причинами отказа от мокрых систем явилось зарастание элементов пылеулавливающего аппарата вследствие гидратации пылевых частиц и сложность использования полученной луппы.

В результате испытаний одноступенчатых установок с применением центробежных скрубберов получено, что степень очистки в них не превышает 90 %, газы после очистки содержат большое

количество пыли мелкой фракции, имеют место значительные колебания эффективности пылеулавливания, а конденсация водяных паров, содержащихся в газах после очистки, приводит к отложению оставшейся пыли в вентиляторе и выбросных трубах.

В стекольной промышленности исследованы и применяются различные типы мокрых пылеуловителей. Недостаточная эффективность очистки, значительные колебания гидравлического сопротивления, чувствительность к изменению уровня жидкости в аппарате ограничивают практическое применение пылеуловителей ударно-инерционного действия. Высокое гидравлическое сопротивление и большой расход воды на газоочистку являются существенными факторами, препятствующими широкому промышленному внедрению скрубберов Бентури. Пенные аппараты, работающие в инерционно-турбулентном режиме, характеризуются высокой степенью очистки при незначительном удельном расходе воды и гидравлическом сопротивлении. Однако, они чувствительны к колебаниям расхода газов, устойчивость работы зависит от плотности поглотительной жидкости и конструкция классического пенного аппарата затрудняет его использование для получения шлама. Гидродинамические пылеуловители, как и другие мокрые аппараты, не нашли применения для очистки нагретых вентиляционных выбросов.

В связи с этим многие авторы считают, что существенное влияние на эффективность мокрых способов пылеулавливания среди прочих параметров пылегазового потока оказывает температура газа.

Цыпура А.А. на основании термодинамического анализа системы пыль-

жидкость сделал вывод, что свободная энергия системы, изменяющаяся от температуры как функция вида  $(a-bT)$ , с увеличением температуры уменьшается и поэтому увеличение температуры газа должно приводить к снижению его загрязненности после очистки.

Однако, результаты многочисленных работ показывают резкое снижение эффективности мокрых аппаратов всех видов при повышении температуры пылегазового потока сверх 100°C.

Основными причинами снижения степени очистки высокотемпературных газов Богатых С.А. считает изменение поверхностного натяжения жидкости с повышением температуры, Тарат Э.Я. и Мухленов И.П. - увеличение скорости в сечении газоочистного аппарата и роста интенсивности испарения улавливающей жидкости, вызывающего резкое уменьшение плотности сращения в аппаратах скрубберного типа, а Ужов В.Н. и Валдберг А.Ю. - высоты исходного слоя жидкости в лентных аппаратах.

Таким образом, отсутствуют однозначные теоретические положения о механизме взаимодействия высокотемпературного пылевого аэрозоля и ассимилирующей жидкости. Недостаточно разработаны теоретические предпосылки, объясняющие процессы осаждения пыли на стадиях газожидкостных режимов.

Значительные разногласия в конструкциях и параметрах пылеулавливающих установок не позволяют определить концептуальный подход к структурным схемам очистки высокотемпературных газов огнекотельных агрегатов производства строительных материалов.

Теоретически и экспериментально не исследована возможность комплексного подхода к очистке высокотемпературных газов с использованием вторичных тепловых ресурсов и уловленной пыли.

Вышеизложенное выявило целесообразность теоретического анализа и экспериментальной оценки механизма и способов мокрого пылеулавливания высокотемпературных газов стекольного и цементного производств с целью создания надежного научного обоснования инженерных решений.

## 2. Характеристика объектов и методов исследований.

В соответствии со сформулированными задачами исследований были разработаны специальные лабораторные установки и стенды, на которых изучались тепломассообменные и аэрогидродинамические процессы, протекающие при различных условиях взаимодействия высокотемпературного пылегазового потока с жидкостью, а также была получена научная информация для разработки схем пылеулавливания, уравнения для расчета характеристик аппаратов и для разработки методики их конструирования, отрабатывались технологические особенности очистки газов стекольного и цементного производства.

Экспериментальные установки разработаны с учетом требований масштабного перехода, все исследования проведены с применением методик рационального планирования эксперимента и для получения достоверных результатов опытные данные обрабатывались на ЭВМ методами математической статистики.

## 3. Теплообменные процессы при контакте высокотемпературного пылевого аэроаэра с жидкостью.

Процесс улавливания пыли диспергированными жидкостями представляет сложный комплекс физико-химического превращения, гидродинамических и тепломассообменных явлений. Роль теплообменных процессов приобретает особое значение при очистке пылегазовых потоков, нагретых до температуры, превышающей температуру насыщения ассимилирующей жидкости.

Теоретическое исследование теплообменных процессов показало, что между частицей, вошедшей в контакт с поверхностью жидкости, и этой жидкостью имеет место обмен тепловой энергией, интенсивность

которого определяется, в основном, температурой частицы, ее формой и теплофизическими свойствами пылинок. При этом возможны два режима вскипания - пузырьковый и пленочный. Интенсивность теплообмена с водой в период паробразования предопределяется временем охлаждения частицы до температуры, равной температуре насыщения, и это время можно оценить по формуле:

$$\tau_i = \frac{F_0}{a} \cdot R_i^2 \quad (1)$$

Для расчета плотности теплового потока получено следующее уравнение:

$$q_i = \frac{\rho \cdot c_p (t_i - t_n) \cdot R_i}{3\tau_i} \cdot 1000 \quad (2)$$

При условии, что рабочее давление в пылеуловителях близко к атмосферному, первая критическая плотность теплового потока при теплообмене пылевой частицы с водой может быть принята равной:

$$q_{кр1} = 1,2 \cdot 10^6 \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (3)$$

Уравнение (2) с условием (3) даст возможность оценить интенсивность теплообмена между водой и высокотемпературной частицей, обладающей различными тепловыми и физическими характеристиками.

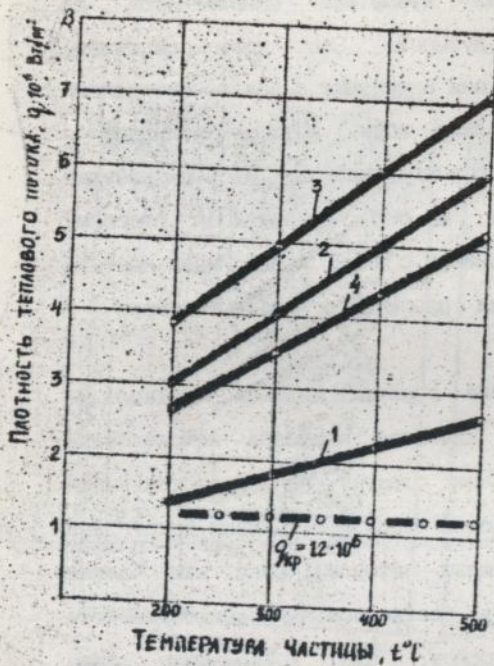


Рис. 1. Зависимость плотности теплового потока от температуры пылевой частицы.  
 1 - кварцевая пыль; 2 - пыль от стекловаренной печи; 3 - доломитовая пыль; 4 - цементная пыль.

С целью проверки теоретического анализа с применением разработанных методик провели экспериментальные исследования поведения высокотемпературного пылегазового потока.

Серия опытов с холодной пылегазовой струей показала, что при вводе в воду этого потока наблюдается внедрение отдельных частиц во всем объеме жидкости, а при подаче горячей, например, с  $t = 200 - 370^\circ \text{C}$ , внедрение пыли не наблюдается. Однако, отмечается в жидкости большое количество отдельных пузырьков, особенно

Расчеты теплообмена для пылей стекольного и цементного производств (кварцевого песка, доломита, выделяющихся при варке стекломассы и получении цементного клинкера) в диапазоне размеров частиц от 1 до 70 мкм, показали, что при температуре пылинки, превышающей температуру кипения более, чем на  $15^\circ \text{C}$ , плотность теплового потока превышает критическую (рис. 1) и на поверхности частиц происходит вскипание жидкости в пленочном режиме, в результате чего они должны быть окружены паровыми рубашками.

значительное количество этих пузырьков скапливается на поверхности крупных газовых пузырей. Это дает основание предположить, что частицы, вступая в контакт с водой, интенсивно отдают свое тепло прилегающим слоям воды, которые вскипают с образованием вокруг частички паровых пузырьков. На этом контакт пылинки с жидкостью прекращается, и она, прилипая к газовому пузырьку, удаляется из воды вместе с ним. Аналогичная картина наблюдается при испытании пыли различного вещественного и дисперсного состава (рис. 2).

На рис. 2 показано поведение горячих пылевых частиц на поверхности воды. Здесь в качестве масштаба использована проволока диаметром 0,1 мм. Как следует из представленной фотографии, при контакте с водой отдельной пылинки вокруг нее образуется паровая рубашка, толщина которой равна или больше масштабной. При попадании в воду конгломерата частиц образуется настолько много паровых пузырьков, что возникающие силы отталкивания разводят частицы от места падения с образованием ореола из частиц, окруженных паровыми рубашками. После охлаждения частиц паровая рубашка исчезает, они соединяются и тонут, что зафиксировано на рис. 3.

Проведенные исследования экспериментально подтвердили образование паровой рубашки вокруг высокотемпературной пылевой частицы при ее контакте с жидкостью. При этом установлено негативное влияние паровой рубашки на эффективность пылеулавливания, заключающееся в следующем:

- при образовании паровой рубашки появляется реактивная сила, отталкивающая частицу от поверхности воды (аналогично капле воды, попавшей на раскаленную плиту);

- при погружении частиц с паровой рубашкой в воду появляется дополнительная выталкивающая сила;

- частица, окруженная паровой рубашкой, становится гидрофобной.

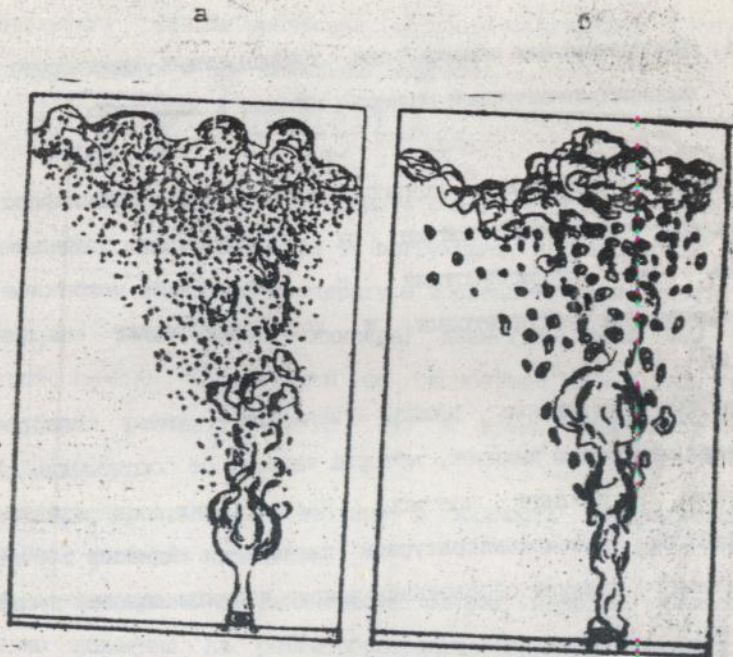


Рис. 2. Взаимодействие пылегазового потока с водой

а - холодный поток; б - температура потока 350 - 370°C

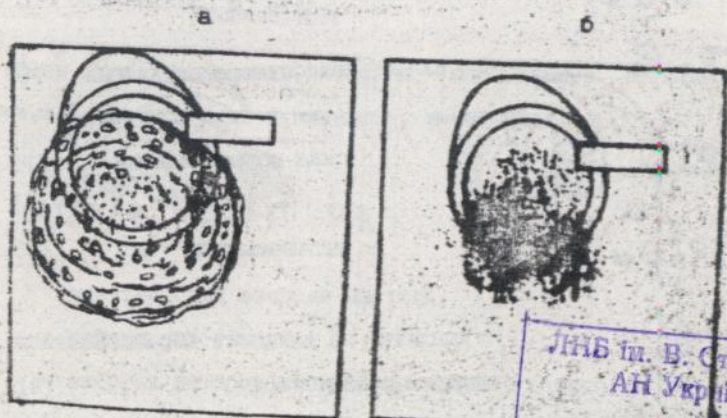


Рис. 3. Взаимодействие пористых частиц с водой

а - температура пыли 370°C; б - охлаждение пыли

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

#### 4. Энергетическая оценка сил, определяющих взаимодействие высокотемпературной пылевой частицы и жидкости.

Известно, что захват нагретых пылинки поверхностью жидкости определяется скоростью частиц, их размерами, особенностями движения и взаимодействия и, как нами установлено, теплофизическими параметрами и характеристиками пылевого аэрозоля.

При пылеулавливании важное значение имеет скорость поглощения жидкостью пылинки, которая зависит от соотношения сил, участвующих в захвате частицы. Баланс сил, определяющих взаимодействие высокотемпературной пылинки и жидкости с учетом установленного явления образования вокруг частицы паровой рубашки имеет вид:

$$F_k = F_H + F_c + F_a + F_n - F_T \quad (4)$$

где

$$F_k = \frac{4}{3} \pi R_n^3 \rho \frac{d^2 S}{dt^2} \quad - \text{сила по второму закону Ньютона} \quad (5)$$

$$F_H = 2 \pi R_n \cdot \sigma \quad - \text{сила поверхностного натяжения} \quad (6)$$

$$F_c = c \cdot \pi R_n^2 \cdot \rho_{ж} \left( \frac{dS}{dt} \right)^2 \quad - \text{сила сопротивления} \quad (7)$$

$$F_a = \frac{4}{3} \pi R_n^3 \rho_{ж} \cdot g \quad - \text{выталкивающая сила} \quad (8)$$

$$F_n = 4 \pi \sigma R_n \quad - \text{давление на жидкость образовавшейся паровой рубашки} \quad (9)$$

$$F_T = \frac{4}{3} \pi R_n^3 \rho g \quad - \text{сила тяжести пылинки} \quad (10)$$

В результате решения уравнения (4) после подстановки в него значений составляющих и при начальных условиях

$$S(\tau, 0) = 0, \quad \frac{dS(\tau, 0)}{d\tau} = W_0 \quad (11)$$

получены уравнения, позволяющие оценить радиус частицы с паровой рубашкой и время, необходимое для ее погружения, в зависимости от размера частицы и начальной температуры последней. В частности, для пылинки (из печи обжига клинкера) диаметром  $R_1 = 4$  мкм с температурой  $t_0 = 200$  °C, летящей со скоростью 12 м/с, диаметр паровой рубашки составит  $1,7 \cdot 10^{-3}$  м, а время погружения  $\tau = (1,2 \dots 1,5) \cdot 10^{-1}$  с.

Возможность проникновения частицы в жидкость определяется энергетической оценкой процесса.

Образование паровой рубашки требует затрат энергии, равной произведению давления на объем образовавшегося пара. Частица, обладающая гидрофобными свойствами, может быть поглощена жидкостью, если глубина проникновения ее в жидкость с условием образования паровой рубашки будет более наружного диаметра последней:

$$h \geq 2R_n$$

В общем виде уравнение энергии, описывающее возможность проникновения частицы пыли в жидкость, имеет вид:

$$E_k + E_T \geq E_n + E_c + L_n + L_b, \quad \text{Дл} \quad (12)$$

где

- $E_k$  - кинетическая энергии частицы;
- $E_T$  - работа сил тяжести;
- $E_n$  - энергия по преодолению силы поверхностного натяжения;
- $E_c$  - энергия по преодолению силы гидравлического сопротивления;

$L_{п}$  - работа образования парового пузыря (действие реактивной силы);

$L_{в}$  - работа по преодолению сил выталкивания.

Нами с помощью расчетов на ЭЭМ оценено значение каждой составляющей уравнения (12) и общего значения баланса энергии для условий пыли стекольного и цементного производств. Зависимость кинетической энергии пылевых частиц и суммарной энергии сил сопротивления проникновению пылевого аэрозоля в воду от размера пылинок и их температуры приведена на рис. 4.

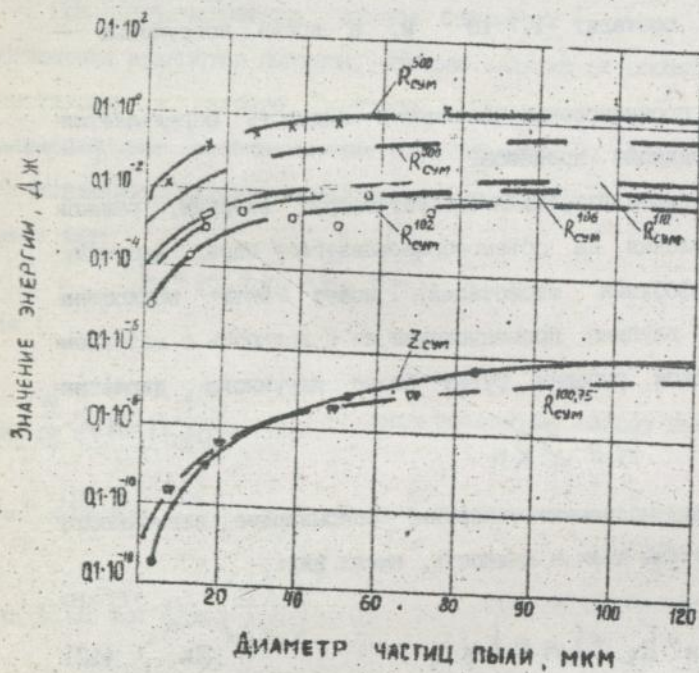


Рис. 4. Энергетическая оценка сил взаимодействия высокотемпературных пылевых частиц с жидкостью.

$Z_{сум}$  - кинетическая энергия пылевых частиц;

$R_{сум}$  - суммарная энергия сил сопротивления.

Из рис. 4. видно, что у пылевых частиц диаметром менее 120 мкм, нагретых до температуры выше  $102^{\circ}\text{C}$ , кинетическая энергия недостаточна для преодоления сил сопротивления проникновению их в слой жидкости. Согласно рис. 4. отмечается тенденция роста значения сил сопротивления с повышением температуры пылевой частицы.

Доля основных сил сопротивления ( $R_1$ ) в суммарной силе сопротивления ( $R_{\text{сум}}$ ) представлена в табл. 1

Таблица 1.

Энергетическая оценка сил сопротивления проникновению

нагретых пылинок в слой жидкости.

(Пример при  $t=200^{\circ}\text{C}$ ;  $d_4=7\text{мкм}$ )

Наименование сил сопротивления	Обозначения	Энергетическая оценка сил сопротивления, Дж	Вклад составляющих в общую энергию сопротивления, %
Сила поверхностного натяжения	$E_H (R_1)$	$0,1492 \cdot 10^{-5}$	0,143
Сила гидравлического сопротивления	$E_C (R_2)$	$0,9429 \cdot 10^{-10}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$
Реактивная сила	$L_P (R_3)$	$0,1043 \cdot 10^{-2}$	99,81
Сила выталкивания	$L_B (R_4)$	$0,2719 \cdot 10^{-5}$	0,026
Суммарная сила сопротивления	$R_{\text{сум}}$	$0,10447 \cdot 10^{-2}$	100

Результаты по порядку величин, входящих в табл. 1, аналогичны для всего спектра температур и размеров частиц. Эти данные свидетельствуют о том, что основной вклад (более 99 %) в общий баланс энергии сопротивления проникновению нагретой пылевой частицы ( $t > 100^\circ\text{C}$ ) в воду приходится на действие реактивной силы при образовании вокруг пылинки парового пузыря.

### 5. Концепция структурных схем мокрой очистки высокотемпературных газов стекольного и цементного производств.

Учитывая особенности механизма взаимодействия высокотемпературного пылевого аэрозоля с водой, необходимость утилизации уловленной пыли и теплоты газов, а также то обстоятельство, что пыль, которая образуется при производстве стеклоизделий и, особенно, цемента, склонна к образованию зарастаний элементов пылеулавливающих аппаратов, концепция мокрой очистки высокотемпературных газов для вышеуказанных производств должна строиться из требования многостадийности структурных схем этого способа очистки.

Обязательным условием этих схем должно быть наличие стадий предварительного охлаждения и адиабатного увлажнения газов, пенного режима и конденсации паров влаги, содержащихся в газе. Очищенные и обезвоженные газы выбрасываются в атмосферу, уловленные шламовые продукты направляются в технологический процесс для повторного использования или применяются при производстве сопутствующих строительных изделий, а утилизируемая тепловая энергия расходуется на цели теплоснабжения или технологического процесса.

Многостадийная очистка газов позволяет достичь высокой

суммарной эффективности пылеулавливания при относительно невысоких затратах воды и энергоресурсов. При этом представляется возможность обогатить ассимилирующую жидкость уловленной пылью до пределов, которые позволяют использовать ее в технологическом процессе производства основного материала.

В зависимости от количества обрабатываемых газов, особенностей температурных условий и состава пыли при аппаратурном оформлении схем мокрой очистки вышеуказанные стадии могут осуществляться в отдельных устройствах, а могут сочетаться в одном аппарате.

Технико-экономический анализ работы действующих на стекольных заводах пылеулавливающих устройств предопределяет целесообразность использования для очистки газовых выбросов от пыли на этих предприятиях пылеуловителей пенного типа. Однако, исследования конструктивных и гидродинамических характеристик таких аппаратов показали на необходимость дальнейшего их совершенствования и разработки на их основе новых схем пылеулавливания с учетом рассмотренных концептуальных принципов.

Анализ основных технологических стадий и изучение особенностей высокотемпературных выбросов стекольного производства показали возможность, целесообразность и перспективность объединения вышеуказанных стадий в одном аппарате. В результате исследований, проведенных нами совместно с НПО "Совнастремэкология", были разработаны теоретические основы высокотемпературного инерционно-пенного пылеуловителя ВТИП.

Характерной особенностью аппарата ВТИП является наличие в нем трех сепарационных зон, соответствующих определенным стадиям пылеулавливания: I зона - удар газового потока о поверхность жидкости; II зона - динамического газожидкостного пенно-струйного слоя; III зона - высокотурбулизованного пенного

слоя. Сочетание трех зон позволяет получить высокую турбулентность газожидкостных слоев за счет циркуляции восходящих и нисходящих потоков жидкости, многократно ее использовать без дополнительных внешних затрат энергии.

Характерные для вращающихся печей обжига цементного клинкера достаточно высокие значения концентрации пыли в отходящих газах ( $6...20 \text{ г/м}^3$ ), большие объемы этих газов ( $120...250 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$ ), повышенные их температуры (до  $450^\circ\text{C}$ ), значительные колебания во времени вышеуказанных трех характеристик, а также большая склонность пыли к налипаниям обусловили необходимость осуществления стадий пылеулавливания в различных аппаратах.

В первой стадии для адиабатического охлаждения и предварительной очистки от пыли крупной фракции целесообразно использовать распылительные аппараты. По сравнению с другими типами аппаратов применение распылительных дает возможность снизить капитальные затраты в 10-12 раз. Наиболее очевидным достоинством распылительных аппаратов являются незначительные гидравлическое сопротивление ( $300-400 \text{ Па}$  в зоне взаимодействия фаз) и простота эксплуатации, обусловленные несложной конструкцией.

Тонкая очистка газов должна осуществляться в пенных аппаратах, например, типа ГДП-М.

Таким образом, предложена и разработана в качестве основного аппаратурно-технического решения по пылесистке высокотемпературных газов вращающихся печей обжига цементного клинкера многоступенчатая схема мокрой очистки, включающая распылительную камеру адиабатического охлаждения и улавливания крупных фракций пыли, модули пенного пылеулавливания тонкой очистки газов, камеру стабилизации уровня жидкости и пены на решетках пенных аппаратов и конденсатор-осушитель очищенных

газов. Количество модулей пенных пылеуловителей определяется в зависимости от расхода очищаемых газов и они включаются в схему параллельно.

6. Механизм ассоциации пыли на стадии динамического газожидкостного режима.

Как установлено выше, высокотемпературная пылевая частица при контакте с жидкостью приобретает паровую рубашку, препятствующую ассимиляции пыли. На стадии динамического газожидкостного режима должно обеспечиваться интенсивное охлаждение и увлажнение пылегазового потока.

Осаждение частиц при этом предусматривает динамическую задачу большой теоретической и практической важности, имеющую прямое отношение к механизму увлажнения аэрозоля.

Для предотвращения негативного влияния паровой рубашки необходимо осуществлять предварительное охлаждение пылевого аэрозоля. Причем, время контакта пылевых частиц с жидкостью должно быть равно или меньше времени движения пылегазового потока в газожидкостном слое. С учетом этого положения и выражения (1) высота необходимого газожидкостного слоя составит:

$$H_n = \frac{F_0 \cdot R_i^2}{a} \cdot W_r \quad (13)$$

Анализ уравнения (13) показывает, что большему  $\Gamma$  - еру частицы пыли требуется большая высота газожидкостного слоя.

На основании этого следует, что для эффективной подготовки горячего пылегазового потока к очистке необходимо разделение пылевого аэрозоля по фракциям.

Эту задачу выполняет, для случая, когда все стадии процесса организованы в одном аппарате, установленная между первой и второй сепарационными зонами разделительная решетка криволинейной формы. При перемещении пылегазового потока вдоль этой решетки появляются центробежные силы, действующие на аэрозольные частицы и обеспечивающие пофракционное разделение пыли.

Для обеспечения сепарационного эффекта радиус изгиба разделительной решетки должен быть равен:

$$R_{изг} = \frac{2\rho \cdot R_4 \cdot W_{ч.т.}}{9\mu_4 \cdot W_p} \quad (14)$$

Оценка условий взаимодействия пыли и жидкости на стадии динамического газожидкостного режима приводит к выводу о преобладании инерционно-турбулентного механизма пылеудаления.

#### 7. Механизм пылеудаления на стадии интенсивного пенного режима.

Тонкая очистка высокотемпературных газов должна завершаться на стадии интенсивного пенного режима. Улавливание мелких фракций на этой стадии осуществляется под воздействием гидродинамического и конденсационного эффектов осаждения одновременно.

Эффект гидродинамического осаждения основан на промывании газа в газожидкостном слое и характеризуется действием инерционного улавливания частиц при входе запыленного газового потока в отверстия тарелки и в слой пены, а также турбулентно-инерционного осаждения частиц пыли на поверхности пены.

При конденсационном улавливании действуют два механизма осаждения пыли: первый - за счет диффузионных сил и Стефановского течения, второй - за счет утяжеления частиц при конденсации на них паров жидкости.

Следует отметить, что на инерционное осаждение существенное влияние оказывает увеличение массы пылевой частицы в результате конденсации на ней водяных паров, т.е. новая масса частицы составит:

$$m_n = m_n + m_{к.п}$$

( $m_{к.п}$  - масса скопившегося на пылинке пара).

С учетом увеличения массы пылевой частицы уравнение ее движения будет иметь вид:

$$m_n \cdot \omega^2 \cdot R_n = 3 \cdot \pi \cdot d_n \cdot \mu \cdot \frac{dR_n}{dt} \quad (15)$$

Из всех механизмов осаждения при осуществлении теплообода в слое пены существенным для повышения эффективности очистки является диффузиофорез. Скорость протекания диффузиофоретического процесса предопределяется величиной разности давления пара, соответственно, в парогазовом потоке на входе в слой пены ( $P_n'$ ) и в условиях насыщения при температуре пленки жидкости ( $P_n''$ ). Анализ этого процесса позволил получить уравнение, описывающее эффективность осаждения частиц при диффузиофорезе.

$$\eta_{дф} = 1 - \exp \left\{ \left[ - \frac{P_{пг} \cdot \sqrt{2M_n}}{(P_n' + P_n'') \cdot \sqrt{M_n} + [2P_{пг} - (P_n' + P_n'')] \sqrt{M_n}} \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{P_n' - P_n''}{P_{пг} - \frac{P_n' - P_n''}{2}} \right\} \quad (16)$$

Таким образом, эффективность осаждения частиц в пузырьке при диффузиофорезе зависит, главным образом, от разности парциальных давлений пара  $P_n'$  и  $P_n''$ .

Учет всех механизмов осаждения при протекании процесса конденсации возможен с помощью энергетического анализа эффективности мокрых пылеуловителей. Зависимость между степенью

очистки газов от действия эффекта конденсации и затратами энергии выражается уравнением:

$$\eta = 1 - e^{-\Delta K_4^x} \quad \text{при } K_4 = K_4' + \Delta i \quad (17)$$

Таким образом, если парогазовую смесь, содержащую взвешенные аэрозольные частицы, пропустить через зону конденсации (зону с развитой холодной поверхностью), то на этой смеси удаляется весьма большая доля пылевых частиц. Количество выводимой пыли, в основном, зависит от степени пересыщения пара в зоне конденсации.

8. Факторы, определяющие энергетические затраты и эффективность пылеулавливания в пенных аппаратах.

При многостадийном процессе мокрой очистки газов основные энергетические затраты и результирующая эффективность пылеулавливания предопределяется стадией пенного режима. Главными факторами, влияющими на эти показатели, являются удельная объемная производительность пылеулавливающего аппарата и удельный расход энергии на перемещение газожидкостной системы и на создание межфазной поверхности. Затраты энергии зависят, в основном, от гидравлического сопротивления аппарата, т.е. от его конструкции и гидродинамического режима, основным приемом интенсификации которого является турбулизация газожидкостной системы, резко уменьшающая диффузионные и термические сопротивления на границе раздела фаз. Кроме того, турбулизация превращает газожидкостный поток в сильно подвижную нестабильную, но динамически устойчивую пену. Таким образом, турбулизация - универсальное средство интенсификации протекающих в ней процессов теплообмена и пылеулавливания.

Одним из основных факторов, влияющих на скорость процесса

пылеулавливания в пенных аппаратах, является поверхность контакта фаз (ПКФ), определяемая поверхностью находящихся в газожидкостном слое пузырьков. Агрегатная ПКФ ( $a_{гр}$ ) характеризует меру турбулентного обмена между фазами.

Определенная с помощью стереометрического метода, разработанного в ЛТИ им. Ленсовета, агрегатная ПКФ описывается следующим уравнением:

$$a_{гр} = 72,8 \cdot \omega^{0,08} \cdot h_0^{-0,14} \cdot \mu_{ж}^{-0,006} \cdot \theta^{0,07} \cdot \rho_{ж}^{-0,275} \quad (18)$$

$$R = 0,862$$

Учитывая, что задача аналитического описания двухфазного газожидкостного слоя весьма сложная и практически не решимая, нами экспериментально исследовано влияние динамических факторов и конструктивных характеристик аппаратов на пенообразование и эффективность пылеулавливания. С помощью методик, основанных на планировании эксперимента, получены следующие эмпирические уравнения:

- для высоты пенного слоя:

$$H_n = 7,8 \cdot W_r^{1,225} \cdot h_0^{0,607} \quad (19)$$

$$R = 0,933$$

- для гидравлического сопротивления пенных аппаратов:

$$\Delta P = 596,6 \cdot W_r^{0,462} \cdot h_0^{0,324} \cdot S_0^{-0,114} \cdot t_r^{0,041} \quad (20)$$

$$R = 0,967$$

При исследовании пылеуловителей в качестве унифицированного комплекса, определяющего степень пылеулавливания ( $\eta$ ), применяют критерий Стокса. Этот критерий предложено использовать и для расчета величины в пенных аппаратах.

На основании проведенных исследований получено уравнение, определяющее фракционную степень очистки газов:

$$\eta_{\text{фр}} = 98,5 \cdot \left( \frac{d_4 \cdot \rho_4 \cdot W_{\text{г}}}{\mu_{\text{г}} \cdot d_0} \right)^{0,015} \quad (21)$$

Общее значение к.п.д. аппарата составит:

$$\eta_{\text{п}} = \frac{\varphi_1 \cdot \eta_{\text{фр}1} + \varphi_2 \cdot \eta_{\text{фр}2} + \dots + \varphi_n \cdot \eta_{\text{фр}n}}{100} \quad (22)$$

где

$\varphi_1 \dots \varphi_n$  - содержание частиц  $i$ -той фракции, %.

Исследование влияния температуры пылегазового потока на степень очистки при многостадийности процесса показало отсутствие значимости температурного фактора, что было установлено также и при изучении влияния динамических параметров пенных аппаратов на эффективность очистки. Результаты исследований свидетельствуют о большом значении предварительной подготовки газов перед пенной стадией увлажнения и о влиянии конденсационного эффекта осаждения.

При предварительном воздействии на пылегазовый поток на стадии адиабатного увлажнения с помощью звука частотой 400-500 Гц получено дополнительное повышение степени очистки за счет акустической коагуляции пыли мелкодисперсных фракций.

### 9. Практическое применение результатов исследований.

На основании проведенных исследований и концептуального подхода к структурным схемам очистки высокотемпературных газов огнетехнических агрегатов производства строительных материалов разработаны с учетом особенностей стекольного и цементного

производства промышленные образцы пылеулавливающего оборудования, характеризующегося высокой эффективностью и позволяющего утилизировать уловленную пыль и теплоту нагретых отходящих газов.

В основу аппаратного оформления систем очистки газов стекольной промышленности легло применение высокотемпературного инерционно-пенного пылеуловителя.

Разработаны конструкции, методика графоаналитического расчета и промышленные образцы аппарата ВТИШ производительности от 5 до 40 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$  горячих газов. Производственные испытания систем обеспыливания на ряде стекольных заводов, оснащенных этими пылеуловителями, показали их высокую пылеулавливающую способность. Так, например, по данным исследований, проведенных нами на Керченском стекольном комбинате, при обеспыливании процессов сушки сырьевых материалов стекольной шихты, степень очистки составила 99,72...99,92 % при  $D_{50} = 12 \text{ мкм}$ ,  $C_{\text{н}} = 3,9...15,2 \text{ г/м}^3$ ,  $\Delta P = 2,5 \text{ кПа}$  и удельном расходе воды на газоочистку 0,022...0,025  $\text{кг/м}^3$ .

Технико-экономическое сравнение ВТИШ с другими известными конструкциями показало, что разработанный аппарат имеет меньшие габариты и массу, а также характеризуется более высокой степенью очистки при сравнительно незначительных затратах на газоочистку.

Пылеуловитель ВТИШ внедрен на ряде стекольных заводов Украины и России. Экономический эффект от внедрения составил около 2,8 млн. руб в год в ценах 1987-1989 гг.

Для условий очистки газов цементного производства решены вопросы предотвращения образования пылевых отложений на элементах системы пылеулавливания и применения пульпы, содержащей уловленную пыль, в технологический процесс производства клинкера. Эти два фактора до настоящего времени сдерживали применение мокрого способа очистки газов цементного производства.

Установлено, что при добавке в сырьевой шлам пульпы влажностью около 80 % в количестве до 15 % от массы сырья сохраняются реологические свойства шлама на уровне, требуемом технологическим процессом. При этом практически не изменяется качество цементного клинкера и не нарушается технологический режим работы вращающейся печи. Использование воды, нагреваемой в системе очистки до 60°C, для приготовления сырьевого шлама интенсифицирует ионообменные процессы, протекающие при этом.

Опытно-промышленные комплексные испытания газоочистной установки на Амвросиевском цементном комбинате производительностью до 160 м<sup>3</sup>/ч горячих газов, разработанной согласно предложенной концепции, подтвердили надежность ее работы, высокую (около 99 %) и стабильную эффективность очистки. Одновременно достигнута высокая степень извлечения вредных газообразных компонентов (оксидов серы - 95 %, оксидов азота - 35 % и CO<sub>2</sub> - 93,5 %), что является существенным преимуществом мокрого способа очистки перед сухими.

Разработаны методики конструирования, подбора и компоновки основного оборудования установок мокрой очистки цементного производства.

#### 10. Термодинамический анализ эффективности мокрой очистки высокотемпературных газов.

Учитывая, что в настоящее время отсутствуют объективные экономические критерии определения эффективности новых процессов и аппаратов нами разработана применительно к цементному производству методика энергетического анализа эффективности регулируемых систем.

Использование этой методики для оценки воздействия

производственных систем на окружающую среду позволяет: ввести объективные количественные характеристики выбросов в окружающую среду; оценить степень глубины переработки природных ресурсов; количественно сопоставить качественно неравноценные природные ресурсы, конечные и побочные продукты; количественно оценить экологическую эффективность различных по характеру процессов и способов предотвращения загрязнения окружающей среды от воздействия производственных систем.

Энергетический анализ экологического воздействия цементной печи с очисткой отходящих газов электрофильтрами и установкой мокрого пылеулавливания, выполненный по результатам работы опытно-промышленной установки Амурсиенского цементобината, показал, что коэффициент "малоотходности" мокрой очистки  $K^c = 0,5670$  ниже соответствующего коэффициента электрофильтра  $K^e = 0,9760$ , а коэффициент экологического действия  $\delta^c = 0,4336$  значительно выше аналогичного коэффициента электрофильтра  $\delta^e = 0,024$ .

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Теоретическими и экспериментальными исследованиями теплообменных процессов, протекающих при взаимодействии высокотемпературной пылевой частицы с ассимилирующей жидкостью, установлено, что при температуре пылевого аэрозоля, превышающей температуру насыщения жидкости, на поверхности пылинки происходит вскипание жидкости в пленочном режиме и, в результате, они будут окружены паровыми рубашками.

2. Предложена модель ассимиляции высокотемпературного пылевого аэрозоля жидкостью, которая учитывает инерционное осаждение частиц из газового потока на поверхности жидкости, материальный и энергетический обмен и установленное явление

3. Анализ сил, определяющих взаимодействие высокотемпературной пылевой частицы и жидкости, а также энергетическая оценка процессов этого взаимодействия показывает, что наличие паровой рубашки вокруг пылевой частицы и условия ее образования в значительной степени оказывают влияние на эффективность улавливания пыли, обусловленное возникновением дополнительной выталкивающей силы при погружении частицы, окруженной паровой рубашкой, и появлением реактивной силы при образовании паровой рубашки, на долю которой приходится более 99% в общем балансе энергии сил сопротивления.

4. Особенности механизма взаимодействия высокотемпературного пылевого аэрозоля с водой и свойства пыли, содержащейся в газах стекольного и цементного производств, обуславливают для получения высокой степени пылеулавливания многостадийность структурных схем мокрого способа очистки. Обязательным условием этих схем должно быть наличие стадий предварительного охлаждения и адиабатического увлажнения газов, пенного режима и конденсации паров влаги, содержащихся в газе. В зависимости от конкретных условий производств схемы очистки газов должны предусматривать утилизацию уловленной пыли и теплоты очищаемых газов согласно требованиям этих производств.

5. Для условий стекольного производства целесообразно и перспективно объединение стадий пылеулавливания в одном аппарате инерционно-пенного режима с самоорошением. Аппаратурно-технологическое решение по мокрой пылеочистке высокотемпературных газов вращающейся печей обжига цементного клинкера предусматривает многоступенчатую схему, включающую распылительный аппарат адиабатического охлаждения и улавливания пыли крупных фракций, модули пенного пылеулавливания, камеру стабилизации уровней жидкости и пены на решетках пенных аппаратов и конденсатор-осушитель очищенных газов.

6. При очистке высокотемпературных вентиляционных выбросов в инерционно-пенном аппарате динамический режим обработки газов характеризуется наличием трех сепарационных зон с последовательно протекающими в них процессами тепловлагообмена, отличающихся механизмом извлечения пылевого аэрозоля: в первой сепарационной зоне - удар газового потока о поверхность жидкости, охлаждение и адиабатическое увлажнение газов; во второй - контактирование газов и жидкости в пенно-струйном режиме с охлаждением и адиабатическим доувлажнением газов; в третьей зоне - образование тонкодиспергированного газожидкостного пенного слоя и интенсивная конденсация паров влаги, содержащихся в газе.

7. Оценка условий взаимодействия пыли и жидкости на стадии динамического газожидкостного режима свидетельствует о преобладании инерционно-турбулентного режима пылеулавливания. Установлено, что для эффективного протекания на этой стадии процессов тепловлагообмена между пылевой частицей и жидкостью необходимо разделение пылевого аэрозоля по фракциям.

8. При совмещении стадии пылеулавливания в одном аппарате важной характеристикой, определяющей эффективность пылеулавливания, является форма изгиба разделительной решетки, подход с позиций инерционно-турбулентного механизма пылеулавливания позволил определить расчетное уравнение кривизны разделительной решетки, которая обеспечивает наибольший инерционный эффект.

9. На стадии сепарационного режима в пенном слое улавливание мелкодисперсных аэрозольных частиц осуществляется под воздействием гидродинамического и конденсационного эффектов, характеризующихся инерционно-турбулентным и диффузионными механизмами осаждения. Выявлен рост эффективности инерционного механизма пылеулавливания за счет увеличения массы пылевых частиц в результате конденсации на них паров воды.

10. Определено влияние динамических параметров газожижкостного слоя на эффективность пылеулавливания и получены расчетные уравнения зависимости высоты пенного слоя и гидродинамического сопротивления от режимных характеристик обрабатываемых газов и пенных аппаратов. Отсеивающими экспериментами установлено, что при многостадийности процесса очистки высокотемпературных газов значительно влияют на степень пылеулавливания на последней стадии пенного режима скорость газового потока, высота исходного слоя жидкости и диаметр отверстий газораспределительной решетки. При этом не обнаружено влияние температуры пылегазового потока, что свидетельствует о решающем влиянии конденсационного эффекта на пылеулавливание и обеспечение требуемого жидкостного баланса в схеме очистки газов.

11. Разработаны конструкции и методика графоаналитического расчета промышленных высокотемпературных инерционно-пенных пылеуловителей, которые нашли широкое применение в стекольной промышленности. Представлены основные показатели типоразмерного ряда аппаратов ВЭИП производительностью от 5 до 40 тыс. м<sup>3</sup> горячих газов. В промышленных условиях отработаны оптимальные параметры обработки горячих газов в инерционно-пенном режиме. Для цементной промышленности разработаны методика расчета и проектирования отдельных элементов систем мокрой очистки, а также принципы их компоновки.

12. Теоретически обоснованы, разработаны и освоены промышленностью аппаратурно-технологические схемы обеспыливания горячих вентиляционных выбросов стекольного и цементного производства, предусматривающие применение в технологический процесс уловленной пыли и использование теплоты высокотемпературных газов. Результаты производственных испытаний предложенных систем обеспыливания показали высокие эксплуатационные качества и пылеулавливающую способность.

13. Применительно к специфическим условиям цементного производства исследованы и осуществлены способы по ликвидации налипания пыли на элементах установки мокрой очистки газов и исследованы экологические свойства сырьевого шлама, приготовленного с добавками уловленной пыли и промывной жидкости. Показано, что транспортабельность шлама находится в требуемых технологическими условиями пределах при добавлении пульпы в количестве до 15 % от массы сырья. При этом практически не изменяется качество цементного клинкера и не нарушается технологический режим работы вращающейся печи. Одновременно получена довольно высокая степень удаления из вентиляционных выбросов вредных газообразных ингредиентов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ).

14. Внедрением высокотемпературных инерционно-пленных пылеуловителей на ряде заводов Украины и России установлены высокие технико-экономические показатели работы аппаратов и обеспечено получение фактического экономического эффекта в сумме около 2,8 млн. рублей (в ценах 1987 - 1989 гг.).

15. Применение сравнительного эксергетического анализа экологического воздействия цементной печи с очисткой отходящих газов электрофильтрами и установкой мокрого пылеулавливания показало, что коэффициент "малостходности" мокрой очистки значительно ниже соответствующего коэффициента электрофильтра, а коэффициент экологического действия в 18 раз превышает аналогичный коэффициент электрофильтра.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Губарь В.Ф., Лукьянов А.В., Гущин А.М. Утилизация уловленной пыли и физического тепла отходящих газов цементнообжигающих печей // Охрана окружающей среды. - серия 11. - в.5. - 1987.

2. Губарь В.Ф., Петросов В.К., Сербин В.А. Исследование взаимодействия нагретых частиц с фильтрующей жидкостью при очистке продуктов сгорания от пыли // Труды НИИМОТстрома. - Новороссийск. - 1987.

3. Губарь В.Ф. Методологические аспекты экологических проблем с позиций термодинамического анализа // Труды Ростовского Государственного университета. - Ростов на Дону. - 1987. с. 44 - 46.

4. Балоболкин А.Н., Губарь В.Ф., Петросов В.К., Сербин В.А. Перспективы очистки вентиляционных высокотемпературных газов стекольного производства // Труды НПО Стромоэкология. - Новороссийск. - 1988.

5. Петросов В.К., Губарь В.Ф., Сербин В.А. Теплообменные процессы при мокрой очистке высокотемпературных печных газов // Труды НПО "Совстроэкология". - Новороссийск. - 1989.

6. Губарь В.Ф., Лукьянов А.В., Гушин А.М. Пути и методы утилизации теплоты отходящих газов печей обжига клинкера при мокром способе газоочистки // Сб. научных трудов "Новые технологические решения для строительной промышленности Донбасса". - Киев. - УМК ВО. 1989.

7. Губарь В.Ф., Заставнюк О.В. Система очистки и утилизации технологических выбросов стекловаренных печей для нужд теплоснабжения // Сб. "Повышение энергетической эффективности систем теплоснабжения и вентиляции зданий и сооружений". - Челябинск. - 1990.

8. Балоболкин А.Н., Сухнев В.И., Цымбал А.А., Губарь В.Ф., Лукьянов А.В., Ткаченко Т.В., Будин Н.И. Испытание мокрого способа очистки отходящих газов вращающихся печей на Амурскоивском цементном комбинате // Труды НПО Стромоэкология. - Новороссийск. - 1990. - с. 61 - 64.

9. Губарь В.Ф. Теплогенераторы атомных станций теплоснабжения и охрана окружающей среды при их работе // НИИТЭнефтехим. - М., 1991.

10. Губарь В.Ф., Заставнюк В.К. Термодинамический анализ и расчеты теплогенерирующих установок // ДНИИТЭнефтехим. - М.: 1991.

11. Губарь В.Ф., Каплун П.Р., Сербин В.А. Очистка смеси газов, содержащих органические и неорганические компоненты // Сб. научных трудов. - МАКСИ. - Макеевка. - 1993.

12. Губарь В.Ф., Толстых С.А. Система очистки ваграночных газов от пыли и оксида углерода // Сб. научных трудов. - МАКСИ. - Макеевка. - 1993.

13. Губарь В.Ф., Заставнюк О.В. Повышение эффективности очистки завесенесущих газовых потоков в установках с пленочным движением жидкости // Сб. научных трудов. - МАКСИ. - Макеевка. - 1993.

14. Губарь В.Ф., Заставнюк О.В. Анализ процессов течения жидкости со свободной поверхностью в вертикальной цилиндрической трубе // Сб. научных трудов. - МАКСИ. - Макеевка. - 1993.

15. Губарь В.Ф., Самара А.А. Подавление окислов азота при работе валяных стекловаренных печей // Сб. научных трудов. МАКСИ. - Макеевка. - 1993.

16. Губарь В.Ф. Энергетическая оценка процессов взаимодействия высокотемпературной частицы и жидкости при мокрой очистке газов // Экотехнологии и ресурсосбережение. - К.: Наукова думка. - 1994. - № 5 - 6. - с. 101 - 102.

17. Губарь В.Ф. Конденция структурных слем мокрой очистки высокотемпературных газообразных выбросов стекольного и цементного производств // Экотехнологии и ресурсосбережение. - К.: Наукова думка. - 1995. - № 1. - с. 94 - 96.

18. А.С. 1250782. Система пылеприготовления. Губарь В.Ф., Кравец А.Г., Кравченко М.В. - опубл. 15.04.95.

19. А.С. 1519756. Сепаратор. Губарь В.Ф., Губарь А.И., Гудин А.М. - опубл. 8.07.89.

20. Губарь В.Ф., Сербин В.А., Малаха Е.А. Определение коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции // МАКСИ. - Макеевка. - 1980.
21. Губарь В.Ф., Малаха Е.А. Определение коэффициента температуропроводности // МАКСИ. - Макеевка. - 1980.
22. Губарь В.Ф., Малаха Е.А. Определение теплоемкости воздуха // МАКСИ. - Макеевка. - 1980.
23. Губарь В.Ф., Сербин В.А., Малаха Е.А. Определение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов // МАКСИ. - Макеевка. - 1980.
24. Губарь В.Ф., Сербин В.А. Определение теплоты парообразования // МАКСИ. - Макеевка. - 1982.
25. Губарь В.Ф., Сербин В.А., Дьянич А.Х. Исследование процессов во влажном воздухе // МАКСИ. - Макеевка. - 1981.
26. Губарь В.Ф., Белов В.М., Тараченко И.А. Использование вторичных энергоресурсов металлургической промышленности для теплоснабжения промпредприятий // Тезисы докладов Республиканского съездания о повышении эффективности работы тепл. хозяйства республики по экономии топливно-энергетических ресурсов. - Донецк. - 1981.
27. Губарь В.Ф., Малаха Е.А., Заставник В.К. Проблемы утилизации тепла продуктов сгорания стекловаренных печей // Тезисы докладов республиканской НТК "Экономия и рациональное использование сырьевых, топливно-энергетических и др. материальных ресурсов в строительстве". - Харьков. - 1986.
28. Губарь В.Ф., Монах С.И., Лукьянов А.В. Утилизация пыли, уловленной мокрым пылеуловителем в технологической схеме вращающейся цементной печи // Тезисы докладов республиканской НТК "Экономия и рациональное использование сырьевых, топливно-энергетических и др. материальных ресурсов в строительстве". - Харьков. - 1986.

29. Губарь В.Ф., Лукьянов А.Б. Современное состояние проблемы использования физического тепла отходящих газов при производстве строительных материалов // Тезисы докладов областной научно-технической конференции. - Донецк. - 1987.

30. Губарь В.Ф., Петросов В.К. Очистка горячих промышленных выбросов от пыли при производстве стекольных изделий // Тезисы докладов III всесоюзного научно-технического семинара "Применение аппаратов мокрого типа для очистки отходящих газов твердых и газообразных вредных примесей". - М.: 1989.

31. Губарь В.Ф., Монах С.И., Овчаренко И.А. Сравнительная экологическая оценка загрязнения атмосферы выбросами продуктов сгорания при индивидуальном централизованном теплоснабжении жилых районов с неплотной застройкой // Тезисы докладов к зональному семинару "Пути повышения эффективности и надежности систем теплоснабжения и теплопотребления". - Пенза. - 1989.

#### Условные обозначения

$H_n$  - высота пенистого слоя, м;

$W_T$  - скорость газового потока в сечении аппарата над пенообразующей тарелкой, м/с;

$h_0$  - высота исходного слоя жидкости в аппарате, мм;

$S_0$  - площадь живого сечения пенообразующей тарелки, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;

$t'_T$  - температура газового потока на входе в аппарат, °С;

$\Delta P$  - гидравлическое сопротивление аппарата, Па;

$q_v$  - плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$\rho_{ж}, \rho$  - плотность жидкости и пылинки, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  - теплоемкость, Дж/кг град;

$\mu$  - динамический коэффициент вязкости, Па·с;

$t_1$  - начальная температура газа, °С;

$t_n$  - температура насыщения газа, °С;

$\tau_i$  - время охлаждения i-той фракции, с;

$R_n$  - радиус паровой рубашки, м;

- $G$  - коэффициент поверхностного натяжения;  
 $S$  - расстояние погружения, м;  
 $W$  - скорость, м/с;  
 $W_{\tau}$  - тангенциальная составляющая скорости, м/с;  
 $W_p$  - радиальная составляющая скорости, м/с;  
 $d_n$  - новый диаметр частички пыли, м;  
 $\omega$  - угловая скорость пылинки внутри пузырька, м/с;  
 $R_{\tau}$  - радиус частицы пыли, м;  
 $k_{\text{эф}}$  - эффективность осаждения частиц пыли при диффузиофорезе;  
 $P_{\text{пг}}$  - давление парогазовой смеси, Па;  
 $\xi_{\text{II}}, \xi_{\text{III}}$  - степень очистки соответственно во II и III сепарационных зонах;  
 $M_n$  - масса одного Кмоля пара, кг/Кмоль;  
 $C_n$  - начальная концентрация пыли в вентиляционных выбросах, г/м<sup>3</sup>;  
 $F_0$  - число Фурье;  
 $a$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  
 $d_0$  - диаметр отверстия пенообразующей тарелки, мм;  
 $d_{\tau}$  - диаметр пылевой частички, м;  
 $B, x$  - константы, определяемые дисперсным составом пыли;  
 $K_{\tau}$  - удельная энергия контакта частиц, Дж/м<sup>3</sup> газа;  
 $K'_{\tau}$  - энергетические затраты на создание пенного слоя, Дж/м<sup>3</sup> газа;  
 $\Delta i$  - разность энтальпий водяного пара на входе и выходе из пенного слоя, Дж/м<sup>3</sup> газа.

## АННОТАЦИЯ

Губарь В.Ф. Мокрая очистка высокотемпературных газообразных выбросов агрегатов производства строительных материалов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 11.00.11 - охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов. Донбасская государственная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка, 1995.

Защищается 29 научных работ и 2 авторских свидетельства, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования по проблеме охраны воздушного бассейна от пылегазовых выбросов стекльного и цементного производств.

Изучены тепломассообменные процессы, протекающие при контакте высокотемпературной пылевой частицы с ассимилирующей жидкостью. Обоснована концепция структурных схем мокрой очистки высокотемпературных газообразных выбросов стекльного и цементного производств, которая должна строиться исходя из требований многостадийности. Разработаны основы высокотемпературного инерционно-пенного пылеуловителя и принципы аппаратно-технологического решения по пылегазоочистке высокотемпературных газов, вырабатываемых печами обжига цементного клинкера, что позволило решить ряд задач - улучшить эксплуатационные характеристики пылеулавливающих систем, повысить эффективность и надежность их функционирования, утилизировать уловленную пыль и вторичные энергоресурсы.

## Summary

Gubar V.F. The conception of the damp cleaning of high temperature gaseous effluent in the building materials production. The thesis for a Doctor's of Technical Sciences degree; speciality 11.00.11 the environment protection and rational utilization of natural resources. Donbass State Academy of Building and Architecture, Makeyevka, 1995.

There are presented 29 scientific works and 2 author's evidences are defended; they containing the theoretical and experimental studies of the problem of air protection from gaseous effluent of the glass and cement productions.

The heat exchange processes taking place at the contact of high temperature dust particle with assimilating liquid have been studied. The conception of structural scheme of wet cleaning of high temperature gaseous effluent of the glass and cement production, which must to develop on the requiments of many stages, has been based. The fundamentals of high temperature inertia-foam dust separator and the principles of technological equipments design on the dust separation of high temperature gas in the rotating kiln for clinker burning have been created. It admits to improve the operation characteristics of the dust collecting systems, to increase the efficiency and safety of their operation, to intensify dust collecting processes as well as to utilize collected dust and secondary power resources.

Ключові слова: високотемпературний пил, вода, тепломасообмінні процеси, пара оболонка, багатостадійні схеми підсушування, адиплення, гідродинаміка, пінні апарати, утилізація.

Соискатель

Губарь Б.Ф.

Подписано к печати 22.02.95 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага тип. N 2. Офсет. печать.

Усл. печ. л. 1,83. Уч. - изд. л. 1,53. Тираж 100 экз.

Заказ N 27

Отпечатано на ротопринтере Донбасской государственной академии строительства и архитектуры, 339023, г.Макеевка-23, ул. Державина, 2.

448053

AB 32.069

**AB 32.069**