

На правах рукописи

**АНИСКИН СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА  
СТРУЙНЫХ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛЕЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

05.21.03 – технология и оборудование химической переработки биомассы  
дерева; химия древесины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Научный консультант: Куров Виктор Сергеевич  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Богданович Николай Иванович  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры целлюлозно- бумажных и  
лесохимических производств Северного  
(Арктического) федерального университета  
им.М.В. Ломоносова

Руденко Анатолий Павлович,  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры сварки летательных аппаратов  
Сибирского государственного  
университета науки и технологий  
им. академика М.Ф. Решетникова

Яблокова Марина Александровна  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой инженерного проектирования  
Санкт-Петербургского государственного  
технологического института (технического  
университета)

Ведущая организация - Санкт-Петербургский государственный  
лесотехнический университет им. С.М.Кирова

Защита состоится «26» декабря 2017 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.236.08 Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна по адресу: 198095 Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, зал заседаний Учёного совета (А-233).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», [www.sutd.ru](http://www.sutd.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

/Махотина Л.Г/

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

При производстве целлюлозы широко применяется оборудование, работа которого основана на переносе вещества из газовой фазы в жидкую фазу и обратно. В технологическом потоке целлюлозного производства применяются абсорберы, десорберы и скрубберы. Оборудование разрабатывается либо специально для ЦБП, либо адаптируется известное оборудование к особенностям производства целлюлозы. Развитие технологии ЦБП предполагает повышение требований к качеству оборудования, его надёжности, эффективности и разработке принципиально новых аппаратов систем газ – жидкость производства целлюлозы.

Одним из перспективных аппаратов является струйный газопромыватель (СГП), в англоязычном оригинале - Jet scrubber), который широко применяется в ЦБП. Актуальность исследований СГП неразрывно связана с развитием современной технологии ЦБП.

Дополнительную актуальность развитию оборудования систем газ-жидкость ЦБП в России придаёт принятый правительством курс на замещение импортного оборудования отечественным.

Автором показана возможность и реализовано применение полномасштабных струйных газопромывателей для очистки дымовых газов содорегенерационного котлоагрегата (СРК), растворителя плава, варочного котла, цеха приготовления сульфитного раствора и других источников газовых выбросов.

Научному исследованию СГП посвящено большое количество работ, которые носят преимущественно прикладной характер. Получено множество эмпирических формул на основе испытаний опытных мелкомасштабных установок, которые используются для решения конкретной прикладной задачи при производстве целлюлозы и не позволяют переносить полученные результаты при проектировании и расчётах аналогичных промышленных аппаратов, используемых на других предприятиях отрасли. Поэтому расширение области применения с разработкой СГП новых конструкций на основе фундаментальных уравнений гидродинамики, диффузии и теплообмена в системе газ-жидкость является актуальной задачей для ЦБП.

### **Цель работы**

Общей целью данной работы является создание теоретической основы моделирования и разработка струйных газопромывателей систем газ-жидкость целлюлозно-бумажных предприятий.

### **Основные задачи**

1. Исследование гидродинамики полидисперсного газожидкостного потока СГП, применяемого в технологических циклах производства целлюлозы, включая дробление струи центробежно-струйной форсункой.
2. Исследование абсорбции и десорбции сероводорода каплями щелочных растворов, используемых в технологическом потоке производства целлюлозы.
3. Исследование очистки газа в СГП от газовых примесей и пыли в различных технологических потоках ЦБП.
4. Исследование и разработка промышленных аппаратов очистки газовых выбросов ЦБП.

### **Научная новизна**

Разработано теоретическое описание движения полидисперсного газожидкостного потока, абсорбции, десорбции и улавливания пыли на основе фундаментальных уравнений гидродинамики, тепло - и массообмена в проточных каналах СГП, применяемых в ЦБП.

Разработана модель конечного эффекта десорбции сероводорода при дроблении струи раствора сульфида натрия на капли.

Обнаружен струйный эффект при очистке газовых выбросов целлюлозного производства в СГП.

Предложено и подтверждено теоретическое описание абсорбции сероводорода раствором гидроксида натрия в струйном газопромывателе сопоставлением с данными экспериментальных исследований.

Подтверждена возможность использования теоретических представлений о массообмене на отдельной капле для масштабного перехода к промышленным аппаратам больших размеров для различных процессов целлюлозного производства. Разработаны новые конструкции СГП, способы очистки газов для ЦБП и других отраслей промышленности.

Обнаружено интенсивное окисление сероводорода при очистке дымовых газов СРК раствором карбоната натрия.

Показана возможность увеличения эффективности очистки дымовых газов от сероводорода в режиме интенсивной конденсации паров воды в СГП, используемых в технологических потоках целлюлозно-бумажного производства.

### **Практическая значимость**

Организовано серийное производство нового комбинированного газоочистного аппарата для целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности, на основе СГП в виде струйного фильтра и пенного слоя.

Разработана методика расчёта СГП систем газ – жидкость в ЦБП. Методика позволяет рассчитывать и разрабатывать новые, более эффективные

и надёжные модификации СГП, технологии очистки газов и регенерации орошающего раствора, минимизировать затраты химических реактивов для целлюлозно-бумажного производства.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях.

X научно-практическая конференция «Проблемы сбросов и выбросов загрязняющих веществ, размещение отходов», СПб., 2001 г.

XII международная научно-практическая международная конференция «Организация системы управления охраной окружающей среды», СПб., 2002 г.

Международная межотраслевая конференция «Организация системы управления природными ресурсами и повышение эффективности экологической безопасности». СПб: Знание, 2004г. с.289-294.

Международная научно-практическая конференция. МНПК – 49. «Новая наука: от идеи к результату». - Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. Ч.2 - С. 186 – 190.

Международная научно-практическая конференция. МНПК – 66. «Новая наука: от идеи к результату». - Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016. Ч. 3 - С. 152-155.

XV международная научно-практическая конференция. «Гофроиндустрия на современном этапе развития». – СПб: ИКРО «Крона», 2017. – С. 42-44.

### **Публикации**

Основные материалы диссертации изложены в 38 научных работах, в том числе в 21 статье опубликованных в журналах рекомендованных ВАК РФ. Получено 5 патентов Российской Федерации на изобретения.

### **Объём и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и приложения. Текст диссертации составляет 363 страниц, содержит 115 рисунков, 22 таблицы. Приложение содержит документы, подтверждающие практическое использование результатов диссертации. Библиография включает 205 наименований.

### **Положения выносимые на защиту**

1. Модели процессов переноса количества движения, вещества и тепла в газо-жидкостном полидисперсном потоке СГП, применяемого в технологических циклах производства целлюлозы на основе фундаментальных уравнений гидродинамики, диффузии и теплопроводности.

2. Структура дробления жидкости центробежно-струйной форсункой, дисперсный состав и распределение начальной скорости газожидкостной струи в технологических каналах СГП целлюлозного производства.

3. Модели абсорбции и десорбции сероводорода каплями щелочных растворов используемых в технологических потоках производства целлюлозы.

4. Струйный эффект очистки газовых выбросов и представление об устойчивости газового потока в технологических каналах струйных газопромывателей, целлюлозного производства.

5. Теоретическое описание конденсации паров воды в СГП на пыли сульфата натрия, содержащейся в дымовых газах СРК.

6. Методика моделирования промышленных струйных газоочистных аппаратов для предприятий ЦБП на основе процессов переноса на отдельно движущейся капле.

7. Новый комбинированный аппарат для очистки газовых выбросов, сочетающий качества СГП в виде струйного фильтра и пенного аппарата для предприятий ЦБП и других отраслей промышленности

8. Разработка и внедрение оборудования для очистки газовых выбросов в различных технологических потоках ЦБП на Котласском, Архангельском, Соломбальском, Байкальском, Выборгском, Херсонском и Сегежском ЦБК.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Дается общая характеристика содержания диссертации, и формулируются основные положения, выносимые на защиту.

**Первый раздел.** На основе литературного обзора приведена характеристика состояния изучаемой проблемы. Целлюлозно-бумажное производство это сложный химическо-технологический процесс, который предполагает применение специального, во многих случаях нестандартного оборудования. Технологические процессы производства целлюлозы протекают в условиях переноса вещества в газожидкостной среде. Такие системы включают как образование газов из жидкости вследствие процессов десорбции, испарения или пиролиза, так и системы поглощения газов жидкостью в абсорберах и скрубберах. На рис.1 представлена схема сульфатного производства целлюлозы. Наиболее крупными реакторами газ – жидкость являются варочный котёл, СРК, выпарка, которые одновременно являются основными источниками газовых выбросов. Источники обозначены звёздочками на схеме и приведены в таблице 1.

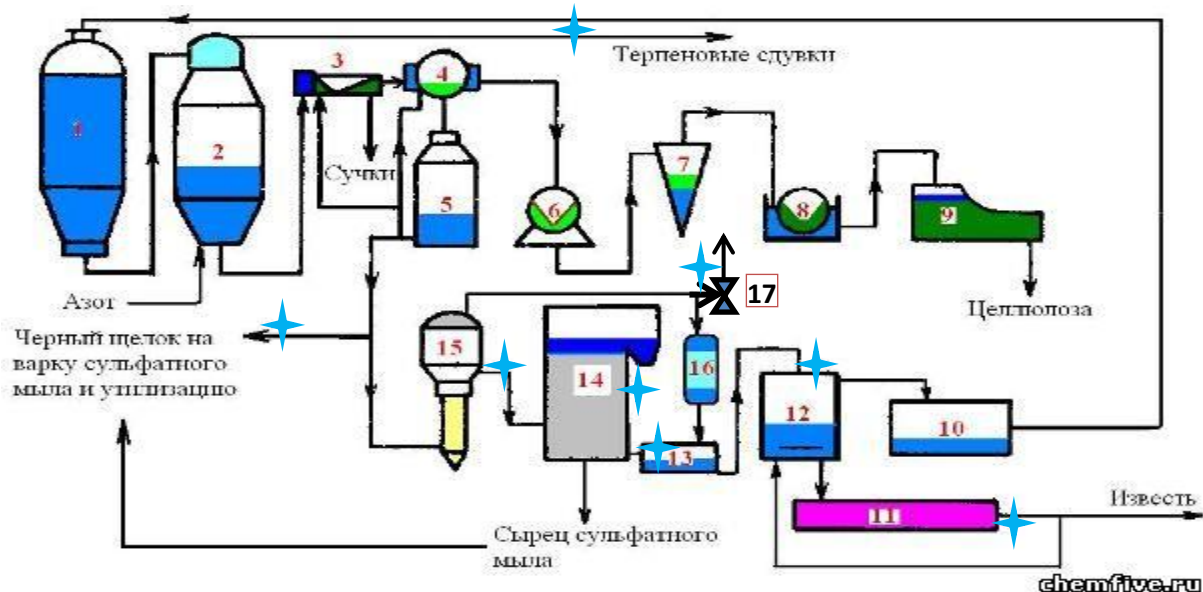


Рис. 1 Схема производства сульфатной целлюлозы: 1 – варочный котёл, 2 – выдувной резервуар, 10 – каустизация, 11 - печь регенерации извести, 13 – растворитель плава, 14 – СРК, 15 – выпарка чёрного щёлока

Таблица 1

Образование газовых выбросов в технологическом потоке производства сульфатной целлюлозы

№	Сульфатное производство целлюлозы	
1	Варочный цех	После бака – аккумулятора
2		После терпентинного конденсатора
3	Выпарной цех	После отстойника - Флорентины
4		Неконденсируемые газы после выпарки
5		Приямок барометрического конденсатора
6	Содорегенерационны цех	Дымовые газы СРК после электрофилтра
7		Вентиляционные газы растворителя плава
8	Цех каустизации и регенерации извести	Дымовые газы извести регенерационной печи
9		Газы из гасителя-классификатора
10	Лесохимический цех	После установки очистки скипидара
11		После установки очистки метилового спирта
12		После установок получения талового масла
13	Цех отбелки целлюлозы	После абсорбера диоксида хлора и фильтров

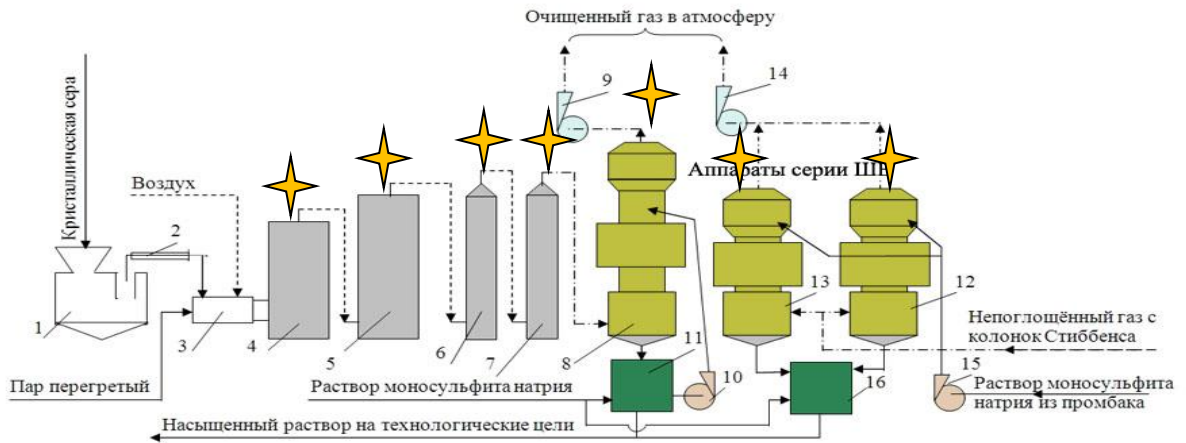


Рис. 2. Схема подготовки варочного раствора сульфитного производства целлюлозы:

1 — бункер-плавильник серы; 2 — транспортная труба плавленной серы; 3 — печь для сжигания серы; 4, 5 — скрубберы 1-ой и 2-ой ступени охлаждения серных газов; 6, 7 — абсорбер № 1 и № 2 получения бисульфита натрия; 8 — абсорбер очистки газа от  $\text{SO}_2$ ; 9, 14 — эксгаустеры; 10, 15 — насосы подачи раствора; 11, 16 — емкости для моносульфита натрия; 12, 13 — абсорберы для очистки газа колонок Стиббенса

На рис. 2 представлена схема подготовки варочного раствора сульфитного производства целлюлозы. Звёздочками обозначено оборудование газ-жидкость. Источники выбросов приведены в таблице 2. На рис. 3 показана схема подготовки раствора для отбеливания целлюлозы, где происходит десорбция и абсорбция диоксида хлора. Многие источники оборудованы газоочистными установками. Наиболее крупные установки используются для очистки дымовых газов энергетических котлов.

Таблица 2

Образование газовых потоков при производстве сульфитной целлюлозы.

№	Сульфитное производство целлюлозы	
1	Цех приготовления варочного раствора	После печи сжигания серы
2		После абсорбера диоксида серы
3	Варочный цех	После варочного котла
4	Цех сушки лигнина	После сушки лигнина
5	Дрожжевой цех	После сушки дрожжей

Важной задачей модификации источников газовых выбросов и газоочистного оборудования целлюлозного производства является снижение потерь серы и натрия, а также снижение экологической нагрузки.

Оценка количества газовых выбросов производства сульфатной целлюлозы была сделана Т.Ф. Личутиной по результатам обследования трёх



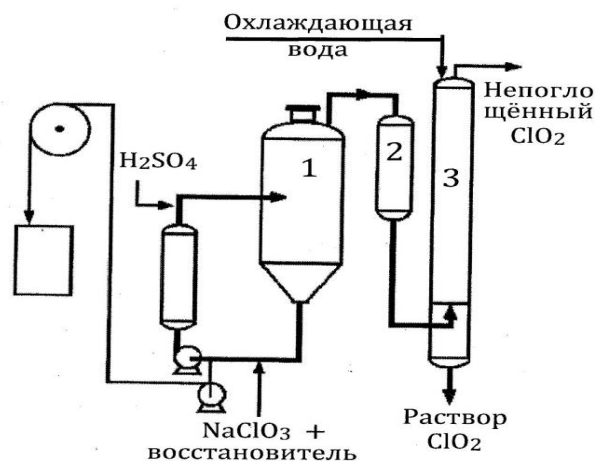


Рис. 3 Технологическая схема получения  $\text{ClO}_2$  способом R2/SVP:  
1 - десорбер, 2 - холодильник,  
3 - абсорбер для получения отбеливающего раствора

предприятий. Они сравнивались с европейскими нормами ВАТ – Best Available Techniques и нормами НСТ Гипробума. Выбросы окислов серы в пересчёте на серу составил 0,58-0,931 кг/т в.с. целлюлозы, выбросы восстановленной серы в пересчёте на серу составил 0,12-0,38 кг/т в.с. целлюлозы, сульфатной пыли: 0,98-3,22 кг/т в.с. целлюлозы.

Результаты обследования показали, что газовые выбросы Российских предприятий превышают европейские нормы. Достижение норм НСТ позволит соответственно снизить потери серы и натрия. Кроме того

достижение норм НСТ позволит снизить экологическую нагрузку, но это не может полностью решить экологическую задачу. При выполнении норм НСТ возможны выбросы, превышающие ПДК, так как оценивание проводится по усреднённой нагрузке, без учёта рассеивания на конкретной местности. В свою очередь, нормы ПДК также как и нормы НСТ не гарантируют комфортных условий для населения, например, в случае метилмеркаптана выполнение норм ПДК не обеспечивает отсутствие его запаха.

Проблема совершенствования оборудования систем газ – жидкость является актуальной и важной частью развития технологии ЦБП в целом.

Представленная работа направлена на решение данной проблемы.

Одним из эффективных аппаратов систем газ – жидкость является струйный газопромыватель СГП. Преимуществом СГП по сравнению с другими аппаратами является сочетание двух важных характеристик: простота конструкции и отсутствие сопротивления газовому потоку в результате эжекции. СГП применяется во всём мире, в частности, корпорацией передовых промышленных технологий США, корпорации SLY и GEA.

В настоящее время известны струйные газопромыватели с цилиндрическим корпусом двух видов: с линейным профилем (рис. 4а) и с профилем трубы Вентури (рис. 4б).

В разделе приведены известные конструкции СГП и технологические схемы очистки газовых выбросов ЦБП. Новые СГП должны быть более эффективными, более надёжными и более компактными.

Основным недостатком предыдущих исследований было эмпирическое определение характеристик маломасштабных моделей СГП, и отсутствовало теоретическое описание при переходе к промышленным образцам. В данной работе в основу исследования СГП заложено моделирование процессов переноса на отдельно движущейся капле.

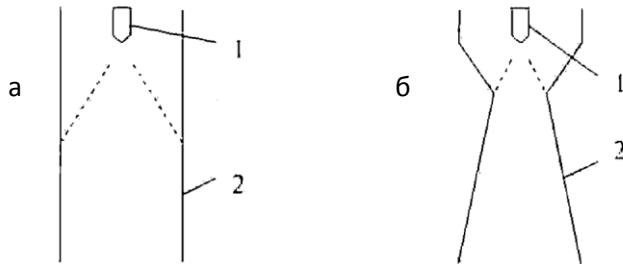


Рис.4 Схема СГП: а - с цилиндрическим корпусом, б - с профилем трубы Вентури.

1 – форсунка, 2 – корпус

Представлены конструкции центробежно-струйных форсунок, позволяющих создавать цельно факельный распыл жидкости. Приведён литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований СГП, используемых как в ЦБП, так и в других отраслях промышленности.

Дается обоснование моделирования очистки газов в СГП на основе исследований процессов тепло - и массообмена движущейся капли.

### Второй раздел.

В разделе представлены результаты исследования гидродинамики в проточных каналах СГП, используемых в технологических потоках ЦБП. При разработке модели движения газа использованы следующие упрощающие условия. Сопротивление на стенках корпуса мало. В области, где орошение отсутствует, распределение скорости газа в поперечном сечении равномерное. Изменение давления в поперечном сечении определяется только движением капель. Капельный поток создаёт объёмные силы, величина которых значительно превосходит силы обусловленные напряжением в газовом потоке. Упрощающим условиям соответствует уравнение Эйлера.

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x, \quad (1)$$

где  $v_x$  и  $v_r$  - соответственно, осевая и радиальная составляющая скорости,  $f_x$  - осевая составляющая объёмной силы,  $p$  - давление газа.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = f_r, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} = 0. \quad (3)$$

Граничные условия имеют следующий вид:

$$v_x = v_{x0}, \quad v_r = v_{r0}, \quad p = p_0 \quad \text{при} \quad x=0; \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \quad \text{при} \quad r=R_w \quad \text{и} \quad r = 0 \quad (4)$$

Капельный поток (рис. 5), создающий объёмную силу, представлен

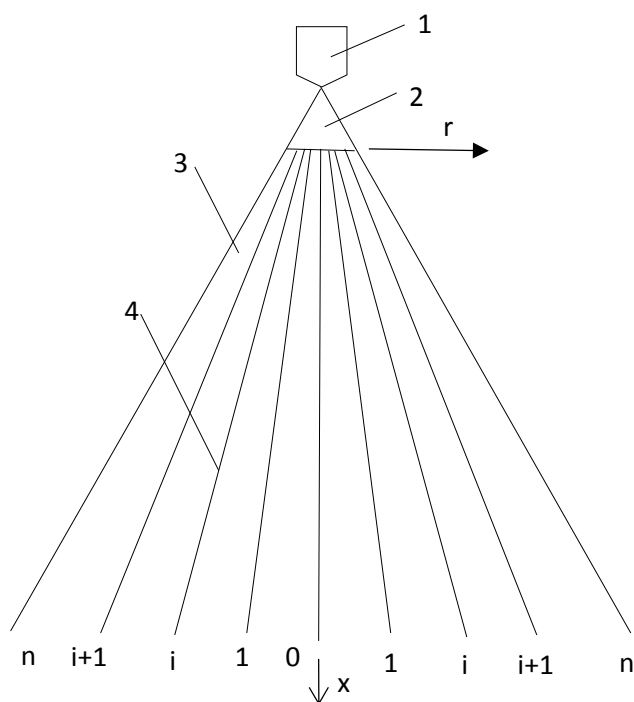


Рис.5 Схема деления потока жидкости истекающей из форсунки. 1 – форсунка, 2 – область дробления жидкости, 3 – область капельного потока, 4 – траектории капель одинакового размера.

состоящим из совокупности конусных монодисперсных капельных потоков  $j$  совмещённых в одном конусе,  $j=1,2, \dots, m$ . Потоки отличаются размерами капель и объёмными расходами. Каждый монодисперсный капельный поток разделяется траекториями движения капель на конечное число осесимметричных струек тока  $i$  с постоянным расходом жидкости,  $i=1,2, \dots, n$ , в которых движение капель незначительно отличается друг от друга. Траектории движения капель в струях каналов модели остаются индивидуальными, что даёт возможность учитывать кинетику абсорбции, теплообмена и улавливания пыли каплями разных размеров и в разных местах струи.

Дискретная модель движения капель приводит к дискретной записи объёмной силы в уравнениях (1, 2), для сплошной среды. Задача объединения дискретной модели движения капель и модели движения сплошной среды газа была решена тремя способами.

Первый способ «дискретный». Газовый поток разбивается на участки по радиусу, в соответствии со схемой на рис.5, для струек наиболее крупных капель. Внутри струек предполагается равномерное распределение скорости газа. Сдвиг в поперечном сечении струек с разным размером капель учитывается коэффициентом совмещения  $\theta$ .

Второй способ «непрерывный». Этот способ стал возможным с развитием компьютерной техники. На каждом шаге  $\Delta X$  формируется непрерывная функция распределения параметров движения капель размером  $j$  путём интерполяции.

$$L_{I_j}(I_{ij}) = I_j ; \quad L_{u_{xj}}(u_{xij}) = u_{xj} ; \quad L_{F_j}(F_{ij}) = F_j , \quad (5)$$

где  $L$  - оператор интерполирования,  $I$  - плотность орошения,  $u$  - скорость капель,  $F$  - сила сопротивления капель,

Третий способ «подобия». Предполагается, что  $f_r=0$ . Используется подобие между функцией распределения скорости газа в капельной струе и

плотностью орошения в следующем виде.

$$\frac{v_x^2 - v_{xw}^2}{i_0} = c^2, \quad (6)$$

где  $i_0$  – относительная плотность орошения,  $c$  – коэффициент пропорциональности. При использовании уравнения (6) уравнение Эйлера в интегральной форме имеет следующий вид.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho v_{xw}^2 S_w + \rho c^2 S_s + P S_w) = - \sum_{j=1}^m G_j \left( \frac{\partial u_{xi}}{\partial x} \right)_j, \quad (7)$$

где  $S_w, S_s$  – площадь сечения соответственно СГП и струи,  $G_j$  – массовый расход капель размером  $j$ .

Для изучения процесса дробления, его особенностей и для постановки граничных условий проведено исследование области дробления жидкостной струи. Как показано на рис. 6 распадающуюся струю можно условно разделить

на три участка: связанного течения, фрагментарного и капельного течения.

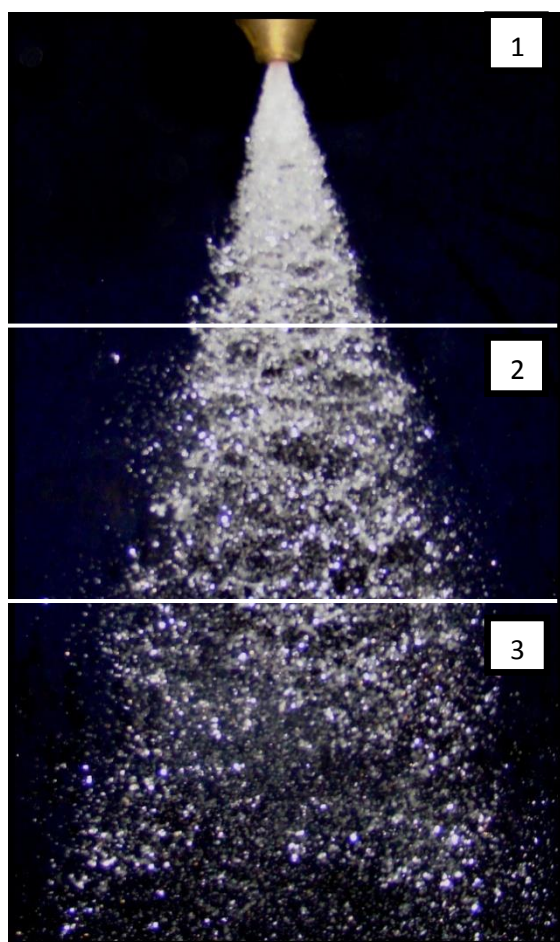


Рис. 6 Схема разделения струи воды центробежно-струйной форсунки на три последовательных участка течения струи: 1 – связанное, 2 – фрагментарное, 3 – капельное



Рис. 7 Фотография связанного участка струи

На рис. 7 видно последовательное развитие волнового движения в струе. Стрелкой указано ядро струи. Масштаб волн возрастает по мере расширения струи. На краях возникает множества тонких струек, дробление которых приводит к

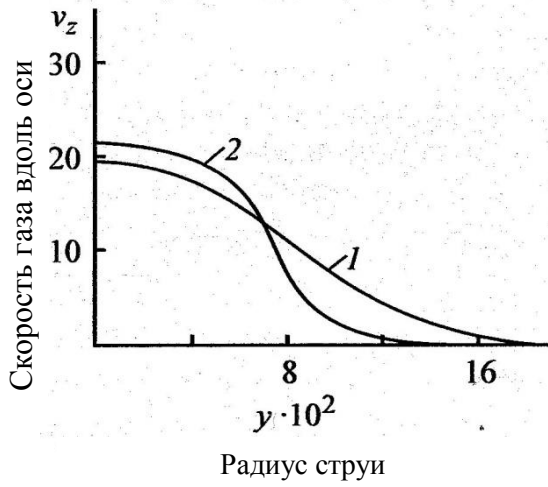


Рис.8 Сопоставление характера распределения скорости газа  $V_z$  ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) для монодисперсного (1) и полидисперсного (2) потоков при  $z=1$  м

образованию капель. Увеличение масштаба волн приводит к поперечным разрывам и возникновению фрагментарной плёночной структуре (в кружках). Определён переход от фрагментарного к капельному течению по объёмному содержанию жидкости  $\beta$ .

$$\beta=0,01 \quad (8)$$

Определение начальной скорости движения капель проведены с помощью специальной фотографической установки. Из результатов измерения следует, что распределение абсолютной скорости по поперечному сечению не зависит от распределения плотности

орошения, образуется в канале сопла форсунки и интерполируется уравнением следующего вида.

$$u_a = u_{am} \cos(\varphi) , \quad (9)$$

где  $u_{am}$ - максимальное значение абсолютной скорости,  $\varphi$  - угол отклонения направления движения капель от оси.

Проведено теоретическое сравнение движения свободной полидисперсной и монодисперсной газожидкостной струи. На рис. 8 приведены кривые распределения скорости газа по сечению струи.

При расчёте монодисперсного потока диаметр капель принимался равный диаметру Заутера для полидисперсного потока. Сравнение расчётных кривых 1 и 2 показывает, что

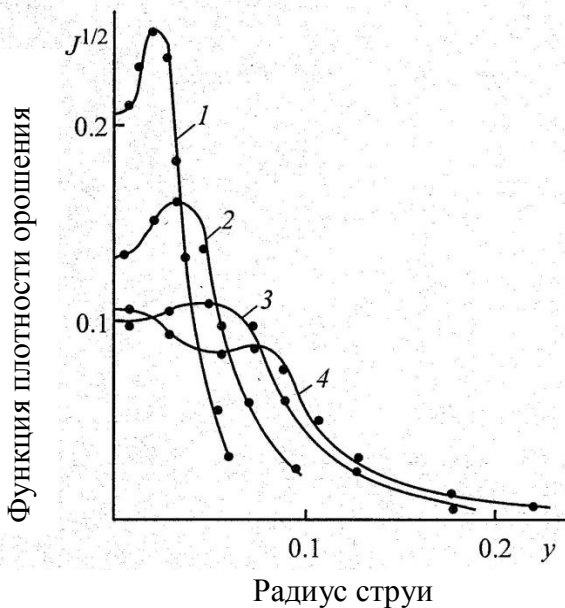


Рис.9 Распределение плотности орошения  $J$  ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) по радиусу (м) факела газожидкостной струи: давление жидкости перед форсункой 0,6 МПа, диаметр сопла форсунки  $d_c=3\cdot 10^{-3}$  м, угол раскрытия факела  $25^\circ$ , расстояние от сопла форсунки (м): 1-0,3, 2-0,7, 3- 0,9, 4-1,1

полидисперсная струя уже, так как мелкодисперсные капли втягиваются внутрь струи. Адекватность теоретических представлений была подтверждена экспериментально на лабораторном стенде. Исследовалось распределение плотности орошения в поперечном сечении струи на разном расстоянии от форсунки. На рис. 9 представлены полученные графики, которые заметно меняют свою форму, отражая заполнение центральной области мелкими каплями. Среднее расхождение теоретических и экспериментальных результатов не превышало 7 %.

Теоретическое исследование нестационарных характеристик СГП

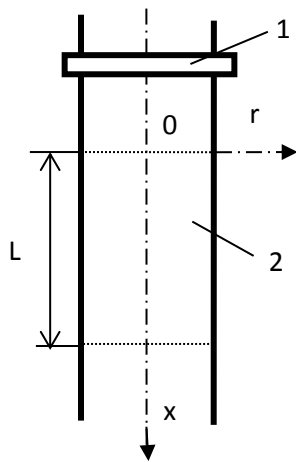
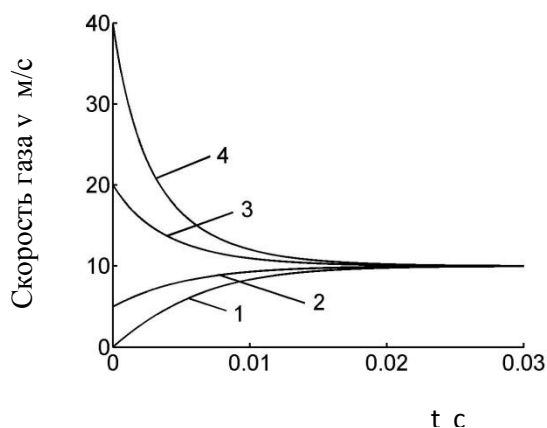


Рис.10 Схема СГП:  
1 – внешнее сопротивление газохода; 2 – область орошения

проводилось при следующих условиях. Корпус СГП имеет форму трубы круглого сечения, как это показано на рис. 10. Жидкость движется в виде монодисперсных капель имеющих постоянную скорость, направление которой совпадает с направлением оси трубы. Аппарат подключен к линии газохода, сопротивление которого определяет среднюю скорость газа в установившемся режиме. Распределение плотности орошения по сечению трубы СГП равномерное. Уравнение движения газового потока:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} + f, \quad (10)$$

начальные условия:  $v = v_0$  при  $t=0$ .



Время от начала орошения каплями

Рис.11 Зависимость скорости движения газа от времени при разных начальных скоростях  $v_0$  м/с: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 20; 4 – 40

Решение уравнения (10) определялось при значениях постоянных величин, выбранными так, чтобы условия течения в трубе были такими же как в СГП. Результат представлен на рис.11. Достижение конечной скорости газа на 95% (время релаксации) составляет 0,016 - 0,012 секунд. Внутри струи скорость газа стабилизируется. В этом смысле СГП является устойчивым, что отличает его от аппаратов, создающих сопротивление газовому потоку, таких как насадочный или пенный аппарат. При исследовании нестационарности СГП также

установлено, что внутри газожидкостной струи могут образовываться газовые вихри из-за неравномерности объёмного содержания капель. Величина коэффициента перемешивания может достигать  $0.01 \text{ м}^2/\text{с}$ .

**Третий раздел.** Важное преимущество технологии целлюлозы среди других производств заключается в наличии развитого цикла регенерации варочного раствора. Это создаёт возможность использовать растворы, образующиеся в циклах регенерации для очистки газовых выбросов. В этом случае очистка газа является рекуперацией серы и натрия и не приводит к увеличению стоимости продукции. Возможность использования щелочных растворов цикла регенерации для абсорбции каплями является самостоятельной задачей.

В разделе представлены результаты исследования абсорбции и десорбции сероводорода каплями щелочных растворов. Задача абсорбции является диффузионной, включает диффузию в газовой среде, перенос через границу раздела фаз и диффузию в жидкой среде капли. Решён ряд задач. В качестве примера приведено решение задачи абсорбции сероводорода в капле водного раствора гидроксида натрия. Протекают следующие химические реакции.



Химические реакции позволяют ускорить абсорбцию. Систему уравнений, описывающую процесс абсорбции сероводорода в капле щелочного раствора, можно записать в следующем виде.

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = D \nabla^2(c_1) - q_1, \quad \frac{\partial c_2}{\partial t} = D \nabla^2(c_2) - q_1 - q_2, \quad \frac{\partial c_3}{\partial t} = D \nabla^2(c_3) + q_1 - q_2, \quad (13)$$

$$\frac{\partial c_4}{\partial t} = D \nabla^2(c_4) + q_2, \quad c_3 = k_1 c_1 c_2, \quad c_4 = k_2 c_2 c_3, \quad (14)$$

где  $\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right)$  - оператор Лапласа;  $r$  – текущий радиус (м);  $R$  – радиус капли (м);  $t$  – время;  $q_1$  и  $q_2$  – скорости объёмного возникновения веществ  $c_2$  и  $c_3$  соответственно ( $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{т}^{-1}$ );  $k_1$ ,  $k_2$  – константы равновесия ( $\text{м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$ ),  $c_1$  –  $c_4$  – концентрации сероводорода, OH-ионов, HS-ионов, S-ионов ( $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$ ),  $A$  – концентрация сероводорода в газовой фазе.

Решение получено при следующих начальных и граничных условиях:

$$c_1 = c_3 = c_4 = 0, \quad c_2 = B, \quad \text{при } t = 0; \quad \nabla c_1 = \nabla c_2 = \nabla c_3 = \nabla c_4 = 0 \quad \text{при } r = 0 \quad (15)$$

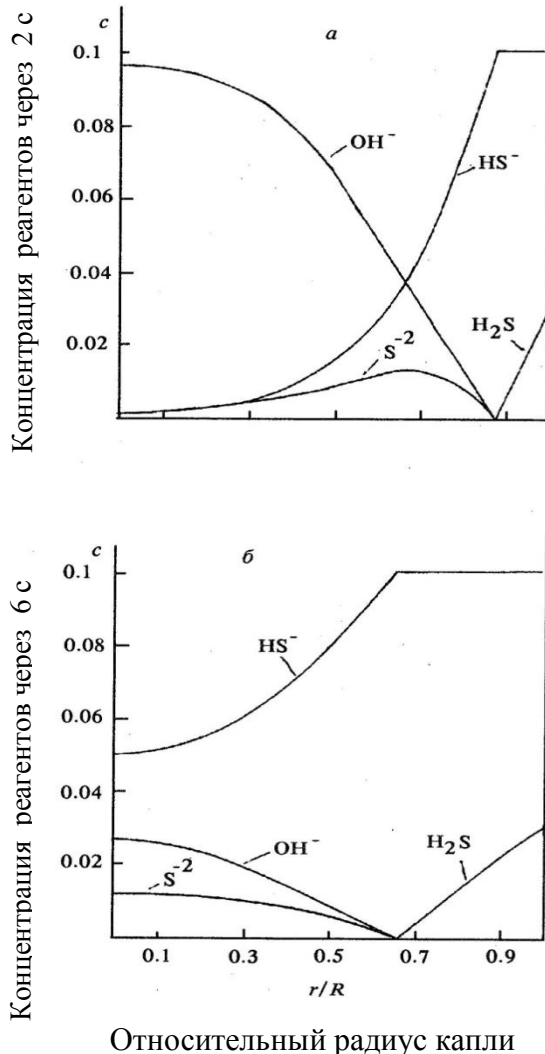
$$\nabla c_2 = \nabla c_3 = \nabla c_4 = 0, \quad c_1 = A_{\text{гр}} \quad \text{при } r=R \quad (16)$$

Для учёта влияния газового пограничного слоя использовалось уравнение аддитивности.

$$\beta_c = \frac{1}{1/\beta_g + \text{He}/\beta_1}, \quad (17)$$

где  $\beta_c$  – коэффициент массопередачи,  $\beta_g$  и  $\beta_1$  – соответственно, коэффициент массоотдачи в газовой и жидкой фазе,  $\text{He}$  – константа Генри.

Решение задачи представлено на рис. 12, где показано распределение реагентов в поперечном сечении капли при времени абсорбции 2 с и 6 с.



Аналогичным способом была решена задача абсорбции сероводорода в капле раствора карбоната натрия. Проведён теоретический анализ на соответствие решения задачи абсорбции с использованием уравнения аддитивности и без использования уравнения аддитивности (17) при низких концентрациях сероводорода. Определена зависимость концентрации сероводорода в жидкой фазе и коэффициентов массопередачи от концентрации гидроксил-ионов для аддитивной модели, и для модели без использования уравнения аддитивности.

На этом основании был разработан метод расчета кинетики хемосорбции

Рис. 12 Распределение концентраций  $c$  (моль·л<sup>-1</sup>) реагентов в процессе абсорбции сероводорода в капле водного раствора гидроксида натрия:

$D=2 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>,  $R=3 \cdot 10^{-4}$  м,  $A=0.03$  моль·л<sup>-1</sup>,  $B=0.1$  моль·л<sup>-1</sup>,  $k_1=2 \cdot 10^7$  л·моль<sup>-1</sup>,  $k_2=9$  л·моль<sup>-1</sup>, число Фурье: а – 0.044 ( $t=2$  с), б=0.133 ( $t=6$  с)

сероводорода в технологическом потоке каплями щелочного раствора с использованием уравнения аддитивности (17).

В разделе представлено более общее решение задачи абсорбции сероводорода, в котором концентрация сероводорода на границе раздела фаз предполагается переменной величиной. Вместо граничного условия(16) использовалось условие равенства потоков.



$$D_1 \nabla c_1 = -\beta g(A - \text{He} \cdot c_1), \quad \text{при } r = R, \quad (18)$$

Решение уравнений с краевыми условиями третьего рода может быть получено только приближенным методом. С этой целью поставлена соответствующая конечно-разностная задача, которая была решена методом прогонки.

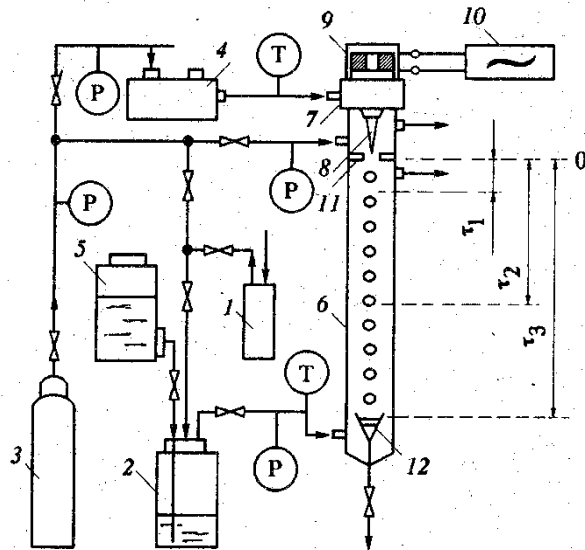


Рис. 13 Схема экспериментальной установки:

1 – реактор для получения сероводорода; 2, 5 – сосуды для дозирования сероводорода; 3 – баллон с азотом; 4 – сосуд в системе дозирования орошающей жидкости; 6 – реактор для осуществления процесса хемосорбции; 7 – генератор монодисперсных капель (ГМК); 8 – игольчатая насадка ГМК; 9 – электромагнит; 10 – электрический генератор низкочастотных колебаний; 11 – диафрагма; 12 – ловушка для капель орошающего раствора

Оценка адекватности проводилась на основе экспериментального исследования абсорбции сероводорода с использованием генератора монодисперсных капель, изображённого на рис. 13. Орошающая жидкость подается из сосуда 4 в генератор монодисперсных капель 7, снабженный игольчатой сопловой насадкой 8, из которой вытекает струйка раствора и дробится на капли. Электромагнит 9 создает с помощью металлической мембраны колебания давления в жидкости, подаваемой на орошение. Капли становятся монодисперсными, когда

частота колебаний этого давления совпадает с основной частотой поверхности струи, вытекающей из сопловой насадки. Место отрыва капель расположено на уровне диафрагмы 11, которая разделяет реактор 6 на две части – верхнюю, предназначенную для подавления конечного эффекта путем отдувки азотом, и нижнюю, где происходит абсорбция сероводорода. Измерялось количество сероводорода, поглощённого каплей  $\bar{c}$ , отнесённое к объёму капли при разном времени контакта  $\tau$ .

Сопоставление результатов решения и измерений на генераторе монодисперсных капель представлены на рис. 14 в виде безразмерной функции отношения  $\bar{c}$  к  $A$  - концентрации сероводорода в газовой фазе. Расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами в области высоких концентраций щелочи можно объяснить следующим образом. Построенная

модель не учитывает сопротивление массопереносу на границе раздела фаз, о котором можно судить по факту естественного ограничения скорости массопереноса через межфазную границу  $v_0$ .

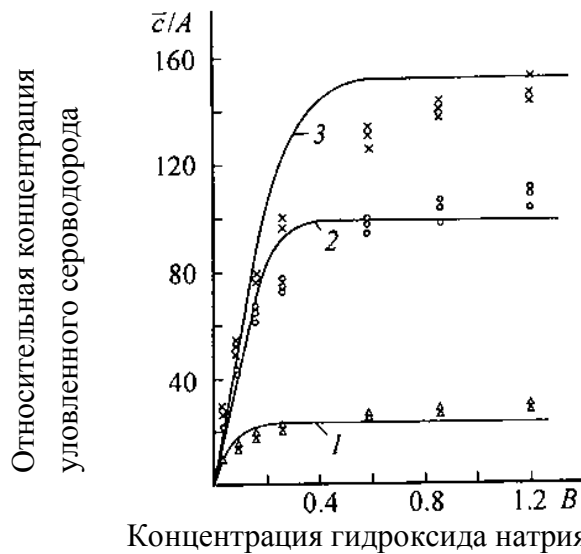


Рис. 14 Зависимость относительной средней концентрации  $\bar{c}/A$  сероводорода, поглощённого каплями от концентрации исходного раствора гидроксида натрия  $B$  (моль·л<sup>-1</sup>) при разном времени абсорбции  $\tau$ .  $T=21^\circ\text{C}$ ,  $D=1.71 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>,  $R=3 \cdot 10^{-4}$  м.  $\tau$  (с): 1 – 0.026, 2 – 0.116, 3 – 0.18



Рис. 15 Зависимость относительной скорости переноса сероводорода  $\lg(v/v_1)$  через межфазную границу в газовой фазе от концентрации исходного раствора гидроксида натрия  $B$  (моль·л<sup>-1</sup>) при разном времени абсорбции  $\tau$ .  $T=21^\circ\text{C}$ ,  $D=1.71 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>,  $R=3 \cdot 10^{-4}$  м,  $v_1=10^{-3}$  м·с<sup>-1</sup>

логарифмической координаты по оси ординат  $\lg(v/v_1)$ . При этом для расчета относительной скорости была выбрана константа  $v_1=10^{-3}$  м·с<sup>-1</sup>. Для удобства оценки проведена горизонтальная линия в логарифмической шкале, соответствующая величине  $v_0=147$  м·с<sup>-1</sup>.

Для оценки этой величины рекомендуется использовать формулу Шрейджа. При  $20^\circ\text{C}$   $v_0 = 147$  м·с<sup>-1</sup>. В случае хемосорбции на рис. 2 представлена схема подготовки варочного раствора сероводорода раствором гидроксида натрия вычисленная в соответствии с построенной моделью скорость массопереноса через межфазную границу в области высоких концентраций щёлочи оказалась выше, чем  $v_0$ .

Вычисление этой скорости осуществляли по формуле.

$$v = j / A_{\text{гр.}}, \quad (19)$$

где  $j$  – плотность потока сероводорода (кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>);  $A_{\text{гр.}}$  – концентрация сероводорода в газовой фазе на границе раздела фаз (кг·м<sup>-3</sup>).

На рис. 15 приведены результаты вычисления скорости  $v$ , которые для удобства графического изображения представлены с использованием

Из рис. 15 следует, в частности, что при концентрации  $V=0.2$  моль·л<sup>-1</sup> расчетная скорость превосходит предельно возможную скорость  $v_0$ , что приводит к возникновению сопротивления на границе раздела фаз.

Аналогичным способом была решена задача абсорбции сероводорода каплями раствора гидроксида натрия в присутствии диоксида углерода.

В данном разделе представлено экспериментальное исследование процесса десорбции сероводорода с использованием генератора монодисперсных (ГМК) капель (рис.13). В опытах был обнаружен так называемый концевой эффект в момент образования капли. Оказалось, что

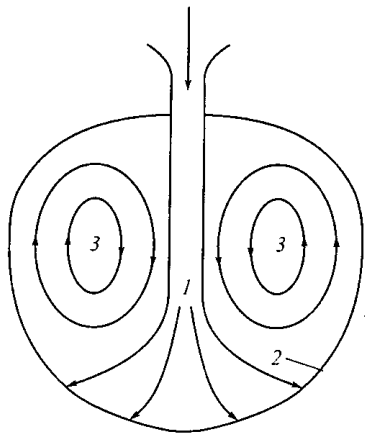


Рис. 16 Схема течения жидкости при формировании капли в ГМК. 1 – струя жидкости, вытекающая в формирующуюся каплю; 2 – капля; 3 – течение жидкости, образующееся внутри капли

десорбция при образовании капли составляет 84-90% всей десорбции сероводорода из капель ГМК, что соответствовало 36-44% суммарного количества сероводорода и сульфид-ионов в исходном растворе. Разработано теоретическое представление о концевом эффекте, которое включает изменения в структуре пограничного слоя внутри и снаружи капли.

На рис. 16 представлена предполагаемая структура движения жидкости при образовании капли из струйки. Структура похожа на вихри Хилла. Поступающая жидкость

механически выносятся на поверхность, что позволяет полностью снять сопротивление переносу вещества в жидкой фазе.

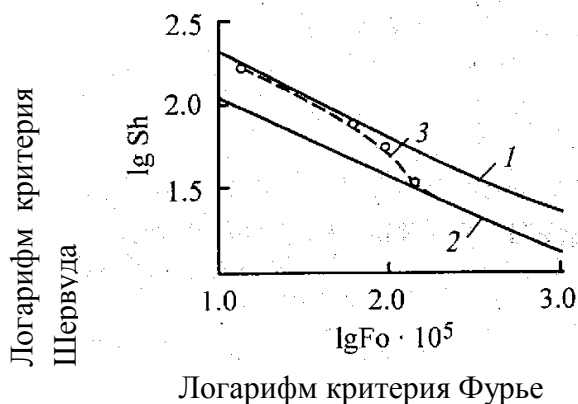


Рис. 17. Зависимость критерия Шервуда  $Sh$  от критерия Фурье  $Fo$ :

1 – модель Кронига-Бринк, 2 – модель Ньюмена, 3 – данные экспериментального исследования абсорбции сероводорода каплями воды в ГМК

Такой механизм образования капли был подтвержден экспериментально на ГМК при исследовании кинетики абсорбции сероводорода при сопротивлении в жидкой фазе. После отрыва капли (рис. 17) кинетика соответствует наличию вихрей Хилла, линия 1 (кинетика Кронига – Бринк), которая быстро затухает, кривая 3 и переходит в

кинетику капли без внутреннего движения, линия 2 (кинетика Ньюмена).

**Четвёртый раздел.** В четвёртом разделе представлены результаты исследования абсорбции, улавливания пыли и теплообмена в СГП, оборудовании систем газ-жидкость целлюлозного производства. Внутри жидкостной струи СГП образуется газовая струя, что создаёт неравномерность течения по поперечному сечению аппарата. При увеличении размеров сечения устанавливают множество форсунок таким образом, чтобы распределить жидкостной и газовый поток более равномерно, предполагая, что подобно насадочным и пенным аппаратам эффективность очистки будет выше. Такое предположение для СГП не является очевидным, поскольку при струйной

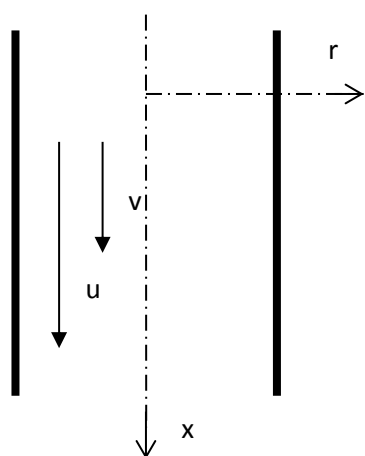


Рис. 18 Схема течения газожидкостного потока

организации движения фаз максимуму скорости движения газа соответствует максимум плотности орошения.

Чтобы ответить на этот вопрос, был рассмотрен процесс стационарной абсорбции в СГП с корпусом в виде прямой трубы круглого сечения (рис.18), со следующими упрощающими условиями. Сопротивление движению газового потока на стенках корпуса отсутствует. Жидкость в виде монодисперсных капель движется внутри трубы с постоянной скоростью, направление которой совпадает с направлением оси трубы. Торможение капель компенсируется внешней силой действующей на

капли. Капли на стенках не осаждаются. Расходы жидкости и газа, протекающими через трубу, являются постоянными. Объёмное содержание жидкости в газовом потоке мало, им можно пренебречь. Газовая примесь, предназначенная для абсорбции, вводится равномерно в некотором нулевом сечении трубы вместе с капельным потоком. Сопротивление процессу абсорбции в жидкой фазе отсутствует. Принятым условиям соответствует уравнение Навье-Стокса.

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} = v_r \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} f \quad (20)$$

С граничными условиями:

$$\frac{\partial v_x}{\partial r} = 0 \text{ при } r=0 \text{ и при } r=R_w; v_r=0, \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \text{ при } x=0 \quad (21)$$

Учитывая граничное условие (21) в уравнении (20) можно не рассматривать инерционные члены, уравнение упростить и записать его в следующем виде.

$$v_r \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{\rho} f \quad (22)$$

Уравнение абсорбции является уравнение диффузии с объёмным стоком.

$$v_x \frac{\partial c}{\partial x} = D_r \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) - q, \quad (23)$$

где  $c$  – концентрация,  $D_r$  – коэффициент поперечного перемешивания,  $q$  – объёмный сток вещества.

Граничные условия к уравнению (23):

$$c = c_0 \quad \text{при } x=0; \quad \frac{\partial c}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r=0 \text{ и при } r=R_w \quad (24)$$

Совместное решение уравнений (22) и (23) получены методом прогонки. Постоянные величины, входящие в эти уравнения, взяты характерными для СГП. Кинематическая вязкость менялась в диапазоне  $0,00002 - 0,2 \text{ м}^2/\text{с}$ . Радиус трубы принят  $0,5 \text{ м}$ . Расчеты показали, что при увеличении турбулентной вязкости до  $0,02 \text{ м}^2/\text{с}$  график распределения скорости газа практически не меняется, графика 1 на рис.19 и только при достижении вязкости  $0,2 \text{ м}^2/\text{с}$  (график 2) возникает заметная разница. Из рис.19 также

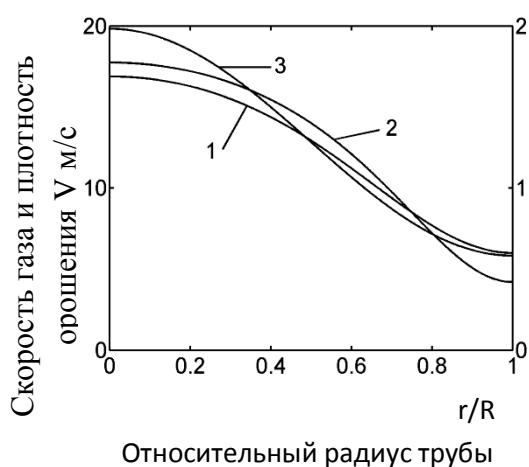


Рис.19 Распределение скорости движения газа (1,2) и плотности орошения (3) по радиусу трубы: 1 – при  $\nu_t = 0,02 \text{ м}^2/\text{с}$ ; 2 – при  $\nu_t = 0,2 \text{ м}^2/\text{с}$



Рис.20 Зависимость количества газовой примеси  $\theta$  от расстояния вдоль оси трубы для равномерного распределения плотности орошения (1) и неравномерного распределения (2,3,4) с разными коэффициентами диффузии  $D$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ): 2 -  $2 \cdot 10^{-5}$ , 3 -  $10^{-3}$ , 4 -  $5 \cdot 10^{-3}$

следует, что внутри жидкостной струи состоящей из капель образуется газовая струя, в которой распределение скорости газа подобно распределению плотности орошения в трубе. На рис. 20 показано снижение количество газовой примеси относительно начальной  $\theta = 2\pi \int_0^R r v c dr / c_0 Q$  вдоль оси трубы.

Сравнение линии 1 (рис. 20) с другими показывает, что при отсутствии перемешивания в струе степень очистки (линия 2) меньше, чем при равномерном орошении, а при интенсивном перемешивании (линия 4) может быть больше более чем в 10 раз.

Полученный результат можно назвать струйным эффектом. Струйный эффект позволяет создать более эффективное и компактное оборудование ЦБП.

Модель очистки газа в СГП построена на основе уравнения диффузии, подобно гидродинамическим моделям, с использованием дискретной модели движения капель.

$$\mathbf{v}_x \frac{\partial c}{\partial x} + \mathbf{v}_r \frac{\partial c}{\partial r} = \mathbf{E} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \right) + \mathbf{q} , \quad (25)$$

где  $c$  – концентрация улавливаемого вещества,  $E$  – коэффициент радиального перемешивания,  $q$  – объёмный сток вещества.

Граничные условия:

$$c=c_0 \text{ при } x=0; \quad \frac{\partial c}{\partial r} = 0 \text{ при } r=0, \text{ при } r=R_w \quad (26)$$

Объёмный сток улавливаемых примесей происходит в потоке капель.

Аналогично гидродинамическим моделям разработаны три модели очистки газа. Они представлены в виде интегральных уравнений диффузии (27, 28, 29). Дискретная модель:

$$\int_0^R r \frac{\partial(v_x c)}{\partial x} dr + R c_R v_{xR} \frac{\partial R}{\partial x} - c_R \frac{\partial}{\partial x} \int_0^R v_x r dr = RE \frac{\partial c_R}{\partial r} + \int_0^R r q dr \quad 0 \leq R \leq R_w \quad (27)$$

Непрерывная модель:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^R c v_x r dr - c_R \frac{\partial}{\partial x} \int_0^R v_x r dr = RE \frac{\partial c_R}{\partial r} + \int_0^R r q dr \quad 0 \leq R \leq R_w \quad (28)$$

Третья модель, уравнение (29), предполагает настолько интенсивное перемешивание газа внутри капельной струи, что распределение концентрации примесей внутри струи можно считать равномерным,  $\frac{\partial c}{\partial r} = 0$ .

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^R c v_x r dr - c \frac{\partial}{\partial x} \int_0^R v_x r dr = \int_0^R r q dr \quad 0 \leq R \leq R_w \quad (29)$$

Уравнение для объёмного стока записывается в следующем виде.

$$q_{ij} = -J_{ij} \frac{6I_{xij}}{d_j u_{xij}} \quad (30)$$

При использовании «непрерывного» способа решения, уравнение (28), дискретную функцию плотности объёмного стока  $q_{ij}$  преобразуется в непрерывную функцию.

$$q_j = L_q(q_{ij}), \quad (31)$$

где  $L_q$  - оператор интерполирования,  $q_j$  - непрерывная функция по радиусу объёмного стока для монодисперсного потока  $j$ .

Объёмный сток вещества в полидисперсном потоке капель можно рассматривать как сумму стоков совокупности монодисперсных потоков.

$$q = \sum_{j=1}^m q_j \quad (32)$$

Плотность потока пыли определяется следующей формулой.

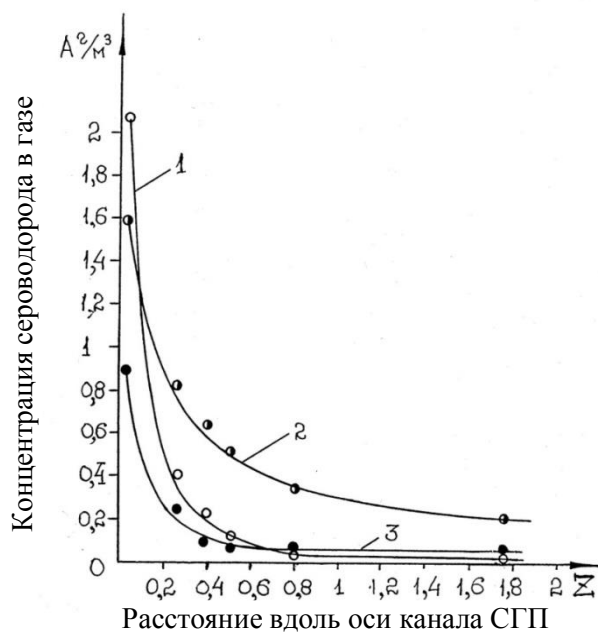


Рис.21 Зависимость концентрации сероводорода  $A$  ( $\text{г}/\text{м}^3$ ) на оси СГП от расстояния  $Z$  (м): расход газа  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ): 1 - 0,29; 2 - 0,874; 3 - 0,108

$$J_{ij} = \frac{1}{4} \eta_{ij} c_c u_{отij}, \quad (33)$$

где  $c_c$  — концентрация пыли,  $u_{отij}$  - относительная скорость между частицами пыли и каплей,  $\eta$  - эффективность осаждения частиц.

Оценка адекватности теоретических представлений об абсорбции газа в СГП представлена на рис. 21, а улавливания пыли на рис. 22. Результаты расчётов абсорбции сероводорода представлены в виде сплошных линий, рис. 21.

Они сравнивались с результатами измерений, показанными точками. Расхождение полученных результатов не превосходило 7%, таким же, как и

при расчёте по дискретной модели, что свидетельствует о правомерности теоретических допущений и математического описания.

На рис.22 представлено сравнение экспериментальных и расчётных данных по эффективности пылеулавливания  $\varepsilon$ , которая представлена через число единиц переноса  $N$ .

$$N = -\ln(1 - \varepsilon) \quad (34)$$

На графике цифрами 1 - 4 обозначены точки сравнения с экспериментальными данными, полученные автором и другими исследователями. В случае фракционного улавливания талька, среднеквадратическое отклонение расчётных значений эффективности улавливания пыли составило 5,5%, для известковой пыли 4,1%, для пыли бака плава 3,1%, что подтверждает адекватность математического описания.

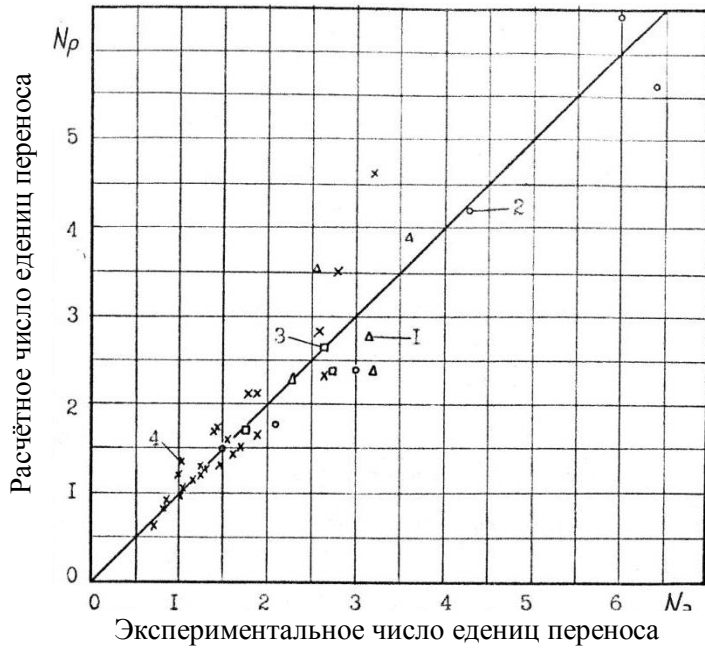


Рис. 22 Сравнение расчётов эффективности улавливания пыли  $N_p$  с результатами измерений  $N_z$ , источники: 1 – бак плава (Пасечник); 2 – ИРП (Прохоров); 3 – бак плава (автор); 4 – тальк (Гирба)

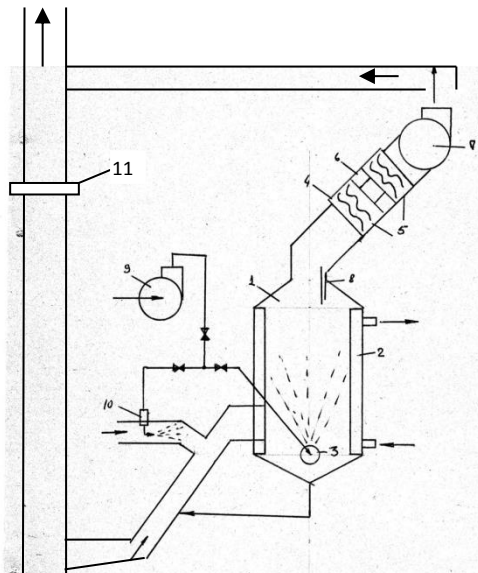


Рис. 23 Схема СГП очистки парогазовых выбросов растворителя плава СРК-3 Котласского ЦБК

охлаждаемыми стенками. Схема аппарата представлена на рис. 23, где 1 – корпус СГП цилиндрической формы, 2 – теплообменник, 3 – распылитель, 4,5,6 – каплеуловитель, 7 – вентилятор, 9 – насос, 11 – запорный клапан. Результаты измерения эффективности очистки газовых выбросов от пыли

Модель теплообмена построена аналогично модели абсорбции, на основе уравнения температуропроводности.

$$\operatorname{div}(\vec{\nabla}T) = \alpha_t \nabla^2 T + \frac{1}{\rho_r c_r} w, \quad (35)$$

где  $\alpha_t = \frac{\lambda_t}{\rho_r c_r}$  – коэффициент турбулентной температуропроводности,  $\lambda_t$  – коэффициент турбулентной теплопроводности,  $w$  – объёмный источник или сток тепла,  $\nabla^2$  – оператор Лапласа.

Объёмный сток тепла из газового потока  $w_{Tij}$  – функция плотности теплового потока через поверхность струйки капель  $q_{ij}$  в газовой фазе.

$$w_{Tij} = \frac{6I_{xij}}{d_j u_{xij}} q_{ij} \quad (36)$$

Проведено теоретическое исследование конденсации на частицах сульфатной пыли в СГП. Обнаружено, что пыль размером 1 мкм за короткое время 0,1 сек может вырасти до 2 мкм, что способствует её осаждению на каплях.

**Пятый раздел.** В пятом разделе представлены результаты применения теоретических исследований при разработке промышленных струйных газопромывателей для очистки и регенерации газовых выбросов. Для парогазовых выбросов из бака плава Котласского ЦБК, разработан СГП с



показали, что СГП позволяет улавливать пыль с эффективностью более 97%, сероводород и метилмеркаптан с эффективностью более 90%.

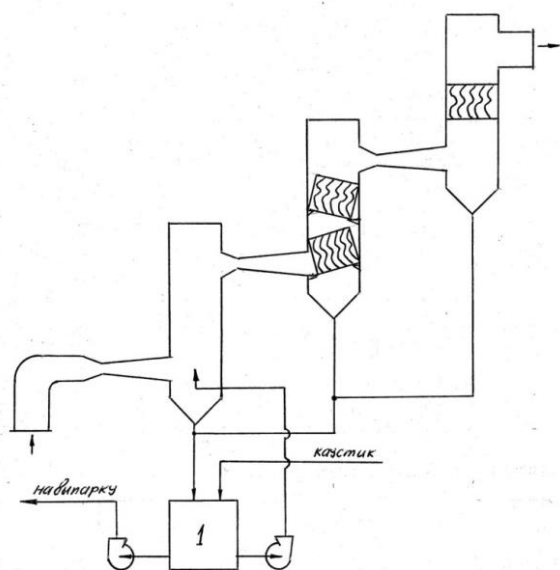


Рис. 24 Схема реконструкции установки очистки дымовых газов Соломбальского ЦБК

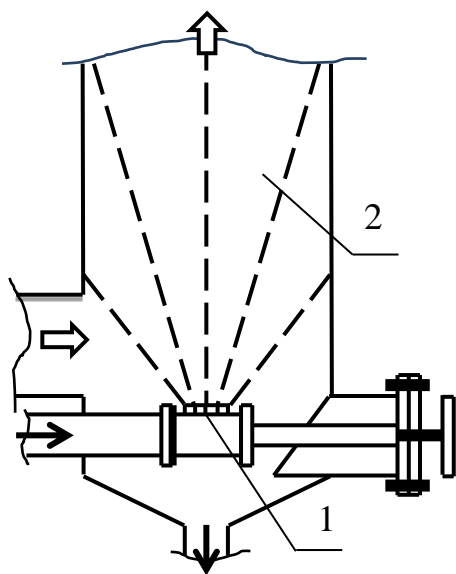


Рис. 25 Схема СГП для очистки дымовых газов Соломбальского ЦБК: 1 – съёмный блок форсунок, 2 – орошение канала СГП

97,8%. Расход каустика составил 650 кг/ч.

На рис. 26 представлена схема замены системы орошения скруббера Гранивор-Циклогалакс Котласского ЦБК на струйное орошение. Реконструкция проводилась для аппарата диаметром 5,136 м, высотой 15 м и

Автором была проведена реконструкция промышленной установки СРК-350 Байкальского ЦБК. Расход нормальных влажных газов 144000 м<sup>3</sup>/ч, удельное орошение 1,33 кг/м<sup>3</sup>р.г., рН раствора 8.5. Результат испытаний показал, что очистка от сероводорода происходила в результате окисления до тиосульфата натрия, причём окисление происходило до попадания сероводорода в орошающий раствор. Эффективность улавливания сероводорода достигла 73%, диоксида серы 84,9%, пыли 79,4%, что превышает аналогичные показатели до реконструкции.

При реконструкции трёхступенчатой дезодорационной установки СРК-720 Санчи-Бреда Соломбальского ЦБК, которая состоит из четырёх параллельных линий очистки газов (рис. 24), автором разработан СГП, рассчитанный на расход до 100 тыс. м<sup>3</sup>/ч дымовые газы. Схема СГП представлена на рис. 25. Для аппарата был разработан автором легкосъёмный блок форсунок, что обеспечило высокую надёжность его работы. Общий расход дымовых газов составил 232400 м<sup>3</sup>/ч. Использовалось четыре параллельно установленных СГП. Во время испытаний очистка газов проходила в режиме испарения орошающего раствора при рН=12÷13.

Очистка от сероводорода составила 95%, от метилмеркаптана 93%, от диоксида серы

производительностью 200000 м<sup>3</sup>/ч нормальных влажных газов. Распылители

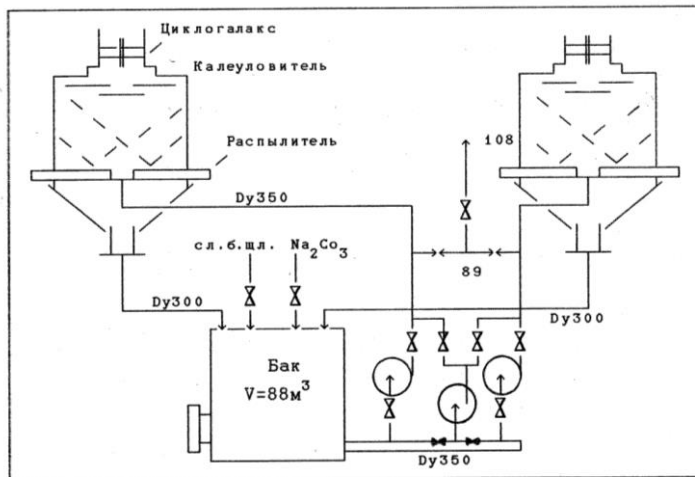


Рис. 26 Схема струйного орошения в корпусе скрубберов Гранивор-Циклогалакс

были установлены в нижней части скруббера и организовывали струйное движение газа в вертикальном направлении. Для орошения использовался раствор кальцинированной соды. Во время испытаний было обнаружено увеличение эффективности улавливания сероводорода при конденсации парогазовых выбросов. Эффективность очистки

возрастала более чем на 30%, а очистка от сероводорода достигала 90%.

Практически весь сероводород улавливался в результате окисления на 97,6%. Полученный результат может быть использован для глубокой очистки газов от сероводорода и метилмеркаптана.

Применительно к сульфитному производству целлюлозы автором разработан СГП для очистки газовых выбросов цеха приготовления варочного раствора Выборгского ЦБК от диоксида серы (рис. 27). СГП состоит из цилиндрической трубы с распылителем 1, жалюзийного каплеуловителя 2, сливного устройства 3, которое предотвращает попадание орошающего раствора в расположенную ниже насадочную колонну абсорбера приготовления варочной кислоты 4. Расход газов, подаваемых на очистку, составлял 6000-8000 м<sup>3</sup>/час. Эффективность очистки менялась от 95,5% до 99,3%.

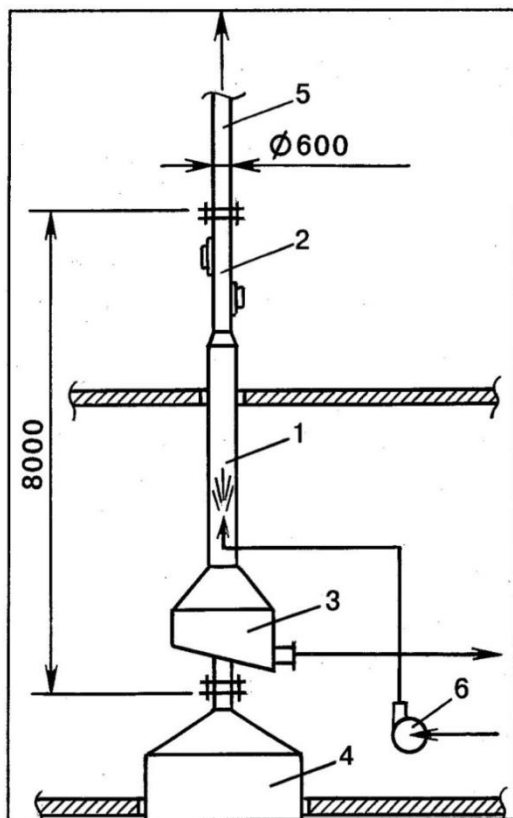


Рис. 27 Схема СГП для очистки газовых выбросов цеха приготовления варочного раствора Выборгского ЦБК

Сопротивление установки, включающее сопротивление двойного жалюзийного каплеуловителя, составило 200 Па.

Свойство стабилизации газового потока в газо-жидкостной струе СГП и

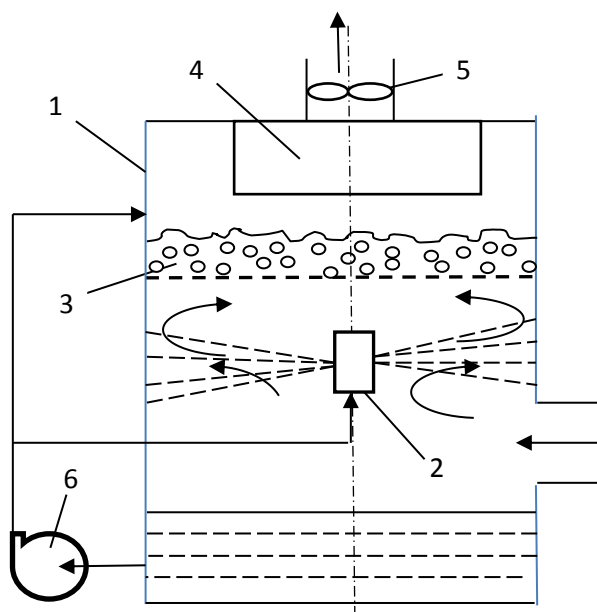


Рис. 28 Схема работы пенного аппарата со струйным фильтром

возможность осесимметричного направления газового потока вследствие эжекции было использовано для разработки комбинированного аппарата, который позволяет более полно и эффективно использовать большую поверхность пенного слоя. Схема аппарата представлена на рис.28. Аппарат включает корпус 1, струйный фильтр 2, сетку с пенным слоем 3, каплеуловитель 4, вентилятор 5 и насос 6. Радиальное осесимметричное движение газа после струйного фильтра, позволяет равномерно распределить газовый поток, проходящий сквозь

пенный слой, обеспечить устойчивость движения газа. Аппарат рассчитан на 4000 м<sup>3</sup>/ч, его сопротивление 150 мм.в.ст., эффективность очистки от хлора – более 98%, может эффективно улавливать сероводород и метилмеркаптан. В настоящее время аппарат производится серийно под названием СПМА (струйный пенный массообменный аппарат). СПМА используется на предприятиях в 20 городах России, в том числе на АО «Сегежский ЦБК» для участка переработки сульфатного мыла, Соломбальским ЦБК и другими предприятиями.

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические модели процессов переноса в газожидкостном полидисперсном потоке струйного газопромывателя, применяемого в технологических циклах производства целлюлозы на основе фундаментальных уравнений гидродинамики, диффузии и теплопроводности.

2. Определены структура дробления жидкости центробежно-струйной форсункой, дисперсный состав и распределение начальной скорости газожидкостной струи в технологических каналах струйных газопромывателей целлюлозного производства.

3. Разработаны модели абсорбции и десорбции сероводорода каплями щелочных растворов используемых в технологических потоках производства целлюлозы, с учётом экспериментально обнаруженного концевое эффекта.

4. Обнаружен и теоретически обоснован струйный эффект очистки газовых выбросов, разработано теоретическое представление об устойчивости и перемешивании газового потока в технологических каналах струйных газопромывателей целлюлозного производства.

5. Разработано теоретическое описание конденсации паров воды в струйном газопромывателе на пыли сульфата натрия, содержащейся в дымовых газах СРК, для повышения эффективности инерционного осаждения пыли на каплях орошающего раствора.

6. Разработана методика моделирования промышленных струйных газоочистных аппаратов для предприятий ЦБП на основе процессов переноса на отдельно движущейся капле.

7. Разработан и производится серийно новый комбинированный аппарат для очистки газовых выбросов, сочетающий качества струйного газопромывателя в виде струйного фильтра и пенного аппарата для предприятий ЦБП и других отраслей промышленности.

8. Разработано и внедрено оборудование для очистки газовых выбросов в различных технологических потоках ЦБП на Котласском, Архангельском, Соломбальском, Байкальском, Выборгском, Херсонском и Сегежском ЦБК.

**Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:**

1. Галустов, В.С. Распыливающие устройства с заполненным факелом для орошения тепло- и массообменных аппаратов. / В.С. Галустов, С.В. Анискин, Е.А. Михайлов // Обзорная информация. Серия ХМ-1 – М.: Химия, - 1984, - 33 С.

2. Галустов, В.С. Тепло- и массообмен в прямоточных распылительных аппаратах/ В.С. Галустов, С.В. Анискин, И.Э. Феддер, А.И. Чуфаровский // ТОХТ. -1987. -т. 21. № 3. - С. 298-303.

3. Анискин, С.В. Струйный эффект очистки газа в прямоточном распылительном аппарате/ С.В. Анискин // ЖПХ. -2010. - Т. 83, № 6.- С. 966-970.

4. Протодяконова, О.И. Влияние полидисперсного состава капель на гидродинамику газожидкостной струи/ О.И. Протодяконова, С.В. Анискин, Ю.И. Кадашевич // ЖПХ. 2001. - Т. 74, № 12. - С. 1994-2000.

5. Анискин, С.В. Теоретико-экспериментальное исследование десорбции сероводорода в процессе образования капель из цилиндрической струи слабощелочного раствора/ С.В. Анискин, И.О. Протодяконов //ЖПХ - 1998. - Т.71. №10. - С.1681-1686.

6. Анискин, С.В. Модель процесса десорбции сероводорода в генераторе монодисперсных капель/ С.В. Анискин, И.О. Протодяконов // ЖПХ. - 2004. - т.77, №4, - С.588-590.

7. Анискин, С.В. Теоретическое исследование процесса десорбции при распаде на капли жидкостной струи цельнофакельной форсунки/ С.В. Анискин, И.О. Протодяконов //ЖПХ. Т.77, №4, - С.591-594.

8. Протодряконова, О.И. Гидродинамическая модель свободного факела распыленной жидкости / О.И. Протодряконова, С.В. Анискин //ЖПХ. - 2001. - Т.74. №3. - С.243-248.
9. Протодряконова, О.И. Экспериментальное исследование газожидкостной струи, образованной цельнофакельной форсункой/ О.И. Протодряконова, С.В. Анискин, И.Е. Слепцов //ЖПХ. - 2002. - Т.75. №2. - С.445-450.
10. Протодряконова, О.И. Гидродинамическая модель стеснённого факела распыленной жидкости/ О.И. Протодряконова, С.В. Анискин//ЖПХ. - 2002. - Т.75. №5.- С.779-785.
11. А.с. СССР 782845 Устройство для очистки газов. / С.В. Анискин., С.П. Пасечник, В.Ф. Максимов. Опубл. 30.11.79 - Б. И.,- №44,
12. Анискин, С.В. Исследование влияния химических реакций на скорость процесса абсорбции сероводорода в капле водного раствора гидроксида натрия/ С.В. Анискин., И.О. Протодряконов, Н.М Бессонов. //ЖПХ. - 1995. - Т.68. №4.- С.662-664.
13. Анискин, С.В. Модель абсорбции сероводорода в капле щелочного раствора с течением в форме вихря Хилла/ С.В. Анискин, И.О. Протодряконов //ЖПХ. - 1995. - Т.68. №5. - С.860-862.
14. Анискин, С.В. Кинетика процесса абсорбции сероводорода в капле раствора карбоната натрия при определяющей роли сопротивления массопереносу в жидкой фазе/ С.В. Анискин, И.О. Протодряконов //ЖПХ. - 1995.- Т.68. №7.- С.1150-1153.
15. Анискин, С.В. Влияние газового пограничного слоя на хемосорбцию сероводорода в капле водного раствора гидроксида натрия/ С.В. Анискин, И.О. Протодряконов //ЖПХ. - 1995. - Т.68. №7. - С.1154-1157.
16. Анискин, С.В. Экспериментальное исследование абсорбции сероводорода в каплях щелочного раствора/ С.В. Анискин, И.О. Протодряконов, В.А. Ионов //ЖПХ. - 1995. - Т.68. №7. - С.1162-1165.
17. Ионов, В.А. Исследование физической абсорбции сероводорода на монодисперсных каплях воды/ В.А. Ионов, С.В. Анискин, Ю.А. Василевский, И.В. Вольф. НИИТЭХИМ - Черкассы, 1988. - Деп. № 1010 – Хи88.
18. Анискин, С.В. Конечно-разностная модель хемосорбции сероводорода в капле водного раствора гидроксида натрия/ С.В Анискин, И.О Протодряконов. Н.М Бессонов. //ЖПХ. - 1998. - Т.71. №6. - С.965-969.
19. Протодряконова, О.И. Теоретическое исследование гидродинамических условий истечения жидкости из форсунок распылительных аппаратов для очистки промышленных газовых выбросов/ Протодряконова О.И., Анискин С.В., Протодряконов И.О. //Материалы международной

межотраслевой конференции «Организация системы управления природными ресурсами и повышение эффективности экологической безопасности». СПб. Знание. - 2004г. - С.289-294.

20. Анискин, С.В. Теоретико-экспериментальная оценка расхода гидроксида натрия при абсорбционной очистки дымовых газов от сероводорода в распылительном скруббере/ С.В. Анискин, О.И. Протодияконова, Ю.И. Кадашевич //ЖПХ. - 2000. - Т.73. №12. - С.1992-1997.

21. Анискин, С.В. Модель совместной абсорбции сероводорода и диоксида углерода в движущейся капле щелочного раствора/ С.В. Анискин, О. И. Протодияконова, С.В. Марасёв //ЖПХ. - 2001. - Т.74. №5. - С.748-753.

22. Анискин, С.В. Влияние сульфита натрия на десорбцию сероводорода из капли щелочного раствора/ С.В Анискин, И.О Протодияконов //ЖПХ. - 1998. - Т.71. №7. - С.1155-1157.

23. Анискин, С.В. Экспериментальное исследование процесса десорбции сероводорода с использованием генератора монодисперсных капель/ С.В Анискин, И.О Протодияконов, В.А. Ионов //ЖПХ. - 1998. - Т.71. №7. - С.1158-1160.

24. Анискин, С.В. Теоретико-экспериментальное исследование десорбции сероводорода в процессе образования капель из цилиндрической струи слабощелочного раствора/ С.В. Анискин, И.О Протодияконов //ЖПХ. - 1998. - Т.71. №10. - С.1681-1686.

25. Анискин, С.В. Совместная абсорбция сероводорода и диоксида углерода в струйном газопромывателе/ С.В. Анискин, И.О. Протодияконова, С.В. Марасёв. //Материалы X научно-практической конференции «Проблемы сбросов и выбросов загрязняющих веществ, размещения отходов». СПб. Знание. - 2001г. - С.96-97.

26. Протодияконова, О.И. Оценка возможности снижения затрат абсорбента при очистке от сероводорода газовых выбросов целлюлозно-бумажного производства/ О.И. Протодияконова., С.В. Анискин //Материалы международной научно-практической конференции «Развитие экологического туризма и экологически безопасного отдыха на воде в Санкт-Петербургском регионе». СПб. Знание. - 2001г. - С.156-157.

27. Протодияконова, О.И, Модель абсорбционной очистки дымовых газов содорегенерационного агрегата от сероводорода в струйном газопромывателе/ О.И. Протодияконова, С.В. Анискин //Материалы межотраслевой научно-практической международной конференции «Организация системы управления охраны окружающей среды. «Знание» СПб. – 2002. – С. 124 -127.

28. Патент РФ RU2079592C1. Способ регенерации химикатов из парогазовых выбросов сульфатного производства целлюлозы. / С.В. Анискин, Л.Б. Краковский, Ю.А. Балакшин, И.Е. Слепцов. Оpubл. 20.05.97.- Бюл. Изобр. - №14.

29. Анискин, С.В. Реконструкция установки для очистки дымовых газов/ С.В. Анискин, В.А. Яковлев, Г.В. Телюкин. // Бумажная промышленность. - 1989. -№6.- С. 12-13.

30. Анискин, С.В. Применение прямоточного распылительного аппарата для очистки дымовых газов содорегенерационных котлов/ С.В. Анискин, В.А. Яковлев. // Промышленная энергетика. – 1991. - №3. - С.24-25.

31. Анискин, С.В. Применение распылительного аппарата для очистки хвостовых газов от диоксида серы/ С.В. Анискин, В.А. Яковлев, О.В. Казаков, Л.Н. Хейкинен //Бумажная промышленность. – 1992. - №6. - С.32.

32. Анискин, С.В. Разработка системы очистки серосодержащих выбросов варочного цеха Херсонского ЦБК/ С.В. Анискин, Н.К. Брыксенкова, С.Н. Смородин, Р.С. Тюльпанов, В.А. Яковлев //Межвуз. сб. научных трудов. «Проблемы топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС» СПбГТУРП. – 2005. – С. 36-41.

33. Патент РФ 26439U1. Массообменный аппарат/ В.А. Смыслов, С.В. Анискин, А.Г. Запорожец. Оpubл. 10.12.02. - Бюл. Изобр. - №36.

34. Патент РФ RU2205679C1. Массообменный аппарат/ В.А. Смыслов, С.В. Анискин, А.Г. Запорожец. Оpubл. 10.06.03. - Бюл. Изобр. - №16.

35. Патент РФ 49460U1. Пенный массообменный аппарат/ Анискин С.В, Запорожец А.Г. Оpubл. 27.11. 05. - Бюл. Изобр. - №33.

36. Патент РФ 2294790C1. Пенный массообменный аппарат/ Анискин С.В, Запорожец А.Г. Оpubл. 10.03.07. - Бюл. Изобр. - № 7.

37. Анискин, С.В. Проблема развития систем газ – жидкость в ЦБП и возможность применения струйных газопромывателей. / С.В. Анискин. // Целлюлоза, бумага, картон. - 2016. -№1.- С. 56-62.

38. Анискин, С.В. Проблема развития оборудования систем газ – жидкость в ЦБП. / С.В. Анискин. //Сб.тр.: XV международная научно-практическая конференция. «Гофроиндустрия на современном этапе развития». – СПб: ИКРО «Крона», 2017. – С. 42-44.