

Автореф  
В 18

Автореф  
В 18

Одесский технологический институт пищевой промышленности  
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. №

00100

ВАРВАРОВ Валерий Васильевич

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ЦЕНТРОБЕЖНО-ИНЕРЦИОННОГО  
УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛЕВИДНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Специальность 05.18.12 - процессы, машины и агрегаты  
пищевой промышленности

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Одесса - 1991

~~ДСП. Исх. № 2  
Осн. д. Прилож. д.  
" 22 марта 1991 г.~~

Работа выполнена в Воронежском технологическом институте.

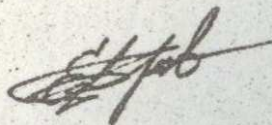
- Научный консультант - доктор технических наук,  
профессор Полянский К.К.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор Космодемьянский Ю.В.,  
чл.корр. Российской сельхозакадемии,  
доктор технических наук  
Харитонов В.Д.,  
доктор технических наук, доцент  
Чагаровский А.П.
- Ведущая организация - Государственная ассоциация  
"Совзконсервмолоко" (г. Москва)

Защита состоится "25" апреля 1991г. в 10<sup>30</sup> часов  
на заседании специализированного совета Д 068. 35. 01 при Одес-  
ском технологическом институте пищевой промышленности им. М.В.  
Ломоносова по адресу: 270039, г.Одесса, ул. Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского  
технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломо-  
носова.

Автореферат разослан "22" марта 1991г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
Д 068.35.01, кандидат  
технических наук, доцент

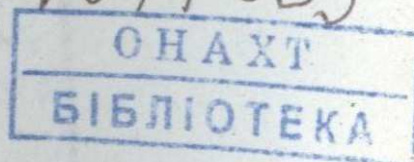


Б.В. Егоров

ОНАХТ 10.02.11  
Разработка способов



v017853



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Одной из крупных проблем, приобретающих в последние годы все большую экологическую роль и отраслевую значимость, является сокращение потерь в технологии сыпучих пищевых продуктов за счет совершенствования очистки выбросов пылевидных фракций, обеспечивающего, в свою очередь, охрану воздушной среды.

Во многих отраслях пищевой и мясо-молочной промышленности частицы пыли представляют собой летучие продукты соответствующих производств (например, переработка зерна, сушка и охлаждение сахара-песка, процессы сушки молока и молочных продуктов, дрожжей, пневмотранспортирование различных сыпучих пищевых продуктов и т.д.). Выброс таких пылевидных пищевых продуктов в окружающую воздушную среду не только способствует развитию кожных аллергических раздражений и общих заболеваний у обслуживающего персонала, увеличению фактора взрывопожароопасности, но и связан с прямыми потерями готовой продукции.

Чтобы удовлетворить санитарно-гигиеническим требованиям с учетом важности проблемы сокращения потерь продукта в качественно новых условиях развития пищевой промышленности, необходимо, в первую очередь, исследовать и реализовать возможности существенного повышения эффективности и стабильности основных способов улавливания пищевых пылей — сухих и мокрых инерционных методов, а также обосновать и регламентировать необходимый уровень очистки отработанного воздуха с учетом возросших экологических требований.

Между тем практика эксплуатации средств очистки воздушных выбросов в пищевой технологии свидетельствует о несоответствии фактической эффективности улавливания пылевидных продуктов проектным показателям и реальным возможностям пылеулавливающих установок. Только при распылительной сушке молока и молочных продуктов средние потери составляют 0,5-0,6 % от производительности сушилок, причем наши расчеты резервов в получении экономического эффекта, которые имеются на стадии очистки отработанного воздуха, показывают, что, теряя в среднем 8 тыс. тонн сухих молочных продуктов (использованы отчетные данные Госагропрома СССР за 1987 г.), страна недополучила за год только по этому виду продукции 8 млн. 628 тыс. рублей.

Серьезной причиной несовершенства средств очистки воздушных выбросов в технологии сыпучих пищевых продуктов, ведущего к

значительным потерям продукции на стадии производства, является не только невысокое качество основных узлов пылеуловителей, недостаточный уровень их эксплуатации, но и недостаточный учет при разработке установок очистки специфических условий работы соответствующего технологического оборудования (сушильные установки, пневмотранспортные линии и т.д.). Проблема осложняется отсутствием в ряде случаев полноценных сведений о физико-химических свойствах пищевых пылей, режимных параметрах запыленного отработанного воздуха, данных об оптимальных типах пылеуловителей для конкретных условий производства. Практика показала, что механический перенос неплохо зарекомендовавшего себя в определенных условиях очистного оборудования в совершенно новые условия может дать отрицательный результат.

В свою очередь, проблема сухого и мокрого центробежно-инерционного улавливания пылевидных продуктов актуальна при ведении многих технологических процессов, причем в ряде случаев требуется совершенствование только сухой очистки выбросов (мукомольное производство, элеваторное хозяйство крахмало-паточных предприятий, табачная, чайная отрасли и т.д.), в других случаях - повышение эффективности мокрого пылеулавливания (сушка и охлаждение сахара-песка, сушка молока и молочных продуктов, сушка дрожжей, кристаллической глюкозы и т.д.). Критерием в данном случае является необходимость возврата уловленного продукта по возможности в кондиционном виде в технологический поток или для реализации.

Цели и задачи. Разработка основных направлений интенсификации сухой и мокрой центробежно-инерционной очистки технологических выбросов на основе теоретического анализа и экспериментальных исследований при максимальном учете производственной специфики технологии сыпучих продуктов, физико-химических и структурно-механических свойств соответствующих пылей, режимных параметров отработанного воздуха, экологических требований.

Методы исследований. В работе использован метод теоретических проработок и экспериментальных исследований на лабораторных опытно-промышленных и промышленных установках, анализа и обобщения показателей работы исследуемых и существующих средств очистки выбросов. Исследования в лабораторных и производственных условиях проводились с использованием общепринятых методик аэродинамических и пылевых замеров. Математическое моделирование изучаемых процессов и обработка результатов исследований проводились с использованием ЭВМ.

Научная новизна. Впервые на базе исследованных основных физико-химических и структурно-механических свойств (дисперсный состав, степень взрывчатости, текучесть, угол естественного оттока, объемная масса и т.д.), а также режимных параметров запыленного отработанного воздуха осуществлено комплексное изучение факторов, влияющих на эффективность очистки выбросов для широкого диапазона видов пылей, образующихся при производстве сухого молока и молочных продуктов, сахара-песка, сухих хлебопекарных и кормовых дрожжей, переработке зерна.

С использованием положений механики аэрозолей разработана математическая модель и основы расчета отделения пылевидных фракций в плоском горизонтальном криволинейном канале с оценкой влияния на траекторию движения частицы ее плотности, размера, скорости потока, его температуры; решены на ЭВМ системы уравнений криволинейного движения частицы применительно к условиям очистки выбросов при сушке пищевых продуктов.

Установлены основные закономерности взаимодействия сред в установках центробежно-инерционной очистки выбросов, основанных на использовании энергии очищаемого воздушного потока и самоорошения, возникающего при вращении узла контактирования ФЭЗ (УКФ). Проанализированы основные закономерности изменения концентрации пылевидного продукта в системах очистки с разработанными УКФ, получены основные уравнения для расчета таких систем.

Сформулирован и экспериментально подтвержден способ конденсационного улавливания аэрозолей, позволяющий значительно интенсифицировать конденсационное укрупнение и улавливание частиц; предложено использовать эффект конденсации при очистке отработанного сушильного воздуха.

На основе математического описания процессов, происходящих в очищающей жидкости при поглощении ею пылевидного продукта, получена формула для расчета концентрации сухих веществ в воде аппарата очистки в зависимости от расхода подпиточной жидкости и времени его работы с момента пуска, установлены закономерности процесса изменения кинематической вязкости и поверхностного натяжения очищающей жидкости.

Определена пенообразующая способность белок содержащих пылей в процессе их мокрого улавливания из отработанного сушильного воздуха; разработана методика расчета кратности пены, образующейся при смешении пылевидного продукта с очищающей жидкостью.

Новизна предложенных технических решений подтверждена 14 ав-

торскими свидетельствами, 3 из которых, описывающие способы интенсификации центробежной сепарации аэрозоля, закрыты Госкомизобретений СССР и имеют грифы "ДСП" и "Не подлежат к опубликованию в открытой печати" в связи с предполагаемой продажей лицензий и патентованием за рубежом.

Практическая ценность и внедрение результатов. Внесен существенный вклад в решение крупной отраслевой проблемы снижения потерь продукции в виде пылевидных фракций с выбросами в атмосферу и повышения эффективности ее защиты в технологии сыпучих пищевых продуктов. Разработаны, утверждены и внедрены на заводах отрасли "Инструкция по эксплуатации систем очистки отработанного воздуха при распылительной сушке молочных продуктов" и "Инструкция по определению плановых показателей по охране атмосферного воздуха и расчету предельно допустимых выбросов в молочно-консервной промышленности". Общий годовой экономический эффект от внедрения инструкций на предприятиях отрасли (внедрено на 52 заводах) — 261,75 тыс.руб. Социальный эффект — оздоровление воздушной среды.

Результаты проведенных работ, связанных с совершенствованием конструктивной схемы подвода воздуха в циклоны очистки сушилки НИРО АТОМАЙЗЕР и улучшением аэродинамики циклонов, внедрены в 1990г. на Балтском молочном комбинате детских продуктов (Одесской обл.). В результате значительно уменьшены потери сухого продукта "Детолакт". Годовой экономический эффект — 122,4 тыс.руб.

На основе и с использованием полученных автором результатов, положительного опыта многолетней эксплуатации мокрого пылеотделителя (линия сушки молочного сахара Я4.0ГВ, Воронежский молочный завод) разработана техдокументация для серийного производства в НИО "Волгмясомолмаш" оборудования для очистки выбросов в линии Я4.0ГВ (при производительности по воздуху до  $1 \text{ м}^3/\text{с}$  экономический эффект — 6,8 тыс. руб. в год на одну сушилку).

Техническая документация по разработанным аппаратам разослана через Воронежский центр научно-технической информации для внедрения в адреса 224 организаций и предприятий по запросам последних.

Материалы диссертации используются в лекционных курсах "Технология молока и молочных продуктов", "Охрана окружающей среды", курсовом и дипломном проектировании Воронежского технологического института, а также в изданных учебных пособиях.

Автор защищает: результаты исследований основных физико-химических и структурно-механических свойств пылевидных фракций; режимных параметров отработанного воздуха при производстве ряда сыпучих пищевых продуктов; основные теоретические положения, экспериментальные результаты, способы и конструкции в сухом и мокром центробежно-инерционном пылеулавливании, обеспечивающие существенное повышение эффективности и стабильности их работы, значительное сокращение потерь при производстве сухого продукта; результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса насыщения очищающей жидкости пылевидным продуктом и пенообразующей способности широкого диапазона белок содержащих пылей; результаты внедрения выполненного комплекса работ в практику пищевых предприятий.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались автором и обсуждались на III Всесоюзной межвузовской конференции по вопросам современного решения проблем охраны труда (г. Кишинев, 1978 г.); конференциях школы передового опыта при Воронежском ЦНТИ (г. Воронеж, 1980, 1981 г.г.); научно-технических конференциях по проблемам охраны труда и окружающей среды Воронежского инженерно-строительного института (1978, 1979, 1980, 1981, 1982 г.г.); Всесоюзном научно-техническом семинаре "Применение аппаратов "мокрого" типа для очистки отходящих газов от твердых и газообразных вредных примесей" (г. Москва, ВДНХ СССР, март, 1985 г.); Всесоюзных коллоквиумах "Процессы и аппараты пищевых производств" (декабрь 1987 г., ноябрь 1988 г., г. Москва, МИНХ им. Г.В. Плеханова); техническом совете ВПО "Союзконсервмолоко" (1985, 1986, 1987, 1988, 1989 г.г.); научно-технических конференциях Воронежского технологического института (1978-1990 г.г.).

Разработанное техническое решение удостоено премии и диплома Воронежского обкома ВЛКСМ (1980 г.).

Основное содержание работы отражено в 50 печатных трудах, из которых книг и брошюр - 3, публикаций в научно-технических журналах пищевых отраслей промышленности - 23, авторских свидетельств - 14.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы, включающего 311 источников, приложения. Объем диссертации 478 стр., включая 276 стр. основного текста, 58 стр. рисунков и 56 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Теоретические основы инерционного пылеулавливания  
и особенности применения данного способа очистки  
в пищевой технологии

Отмечая, что по теории моделирования и механике аэрозолей выполнено значительное количество исследований, в главе рассматриваются вопросы, связанные непосредственно с процессами пылеулавливания, имеющими место в сухих и мокрых установках центробежно-инерционной очистки.

Исследование процесса отделения пылевидных частиц в аппаратах центробежного действия можно разбить на три этапа: 1) анализ течения несущей среды; 2) расчет траекторий движения полидисперсных частиц; 3) учет влияния взаимодействия фаз. На основе рассмотренных в главе теоретических основ центробежно-инерционного пылеулавливания получено решение уравнения прямолинейного движения частицы пыли произвольной формы, справедливое для широкого диапазона чисел Рейнольдса, а также уравнения движения частиц для случая установившегося процесса оседания пыли под действием силы тяжести в изотермическом и неизотермическом восходящих потоках газа (что имеет место при очистке отработанного теплоносителя промышленных сушилок), дан анализ методов расчета аппаратов центробежного действия и математических моделей движения газа в них. Полученные решения использованы в последующих главах, посвященных разработке и исследованию центробежно-инерционных пылеотделителей, что позволило существенно облегчить изложение материала и уменьшить объем диссертации.

Анализ проблемы очистки выбросов применительно к пищевой технологии позволил заключить, что применение центробежно-инерционных способов весьма перспективно в технологии сыпучих пищевых продуктов, основанной на использовании аэродинамических методов, таких как пневматическое измельчение, пневмотранспорт, пневматическая классификация частиц по размерам, пневматическое перемешивание, сушка, псевдоожижение и др., требующих при своем осуществлении высокоэффективного пылеулавливания как с точки зрения охраны окружающей среды, так и для сокращения потерь ценного продукта соответствующих производств. Реализация перечисленных выше процессов осуществляется при самых различных режимах течения пылегазовых потоков как по дисперсному составу и концент-

рации пыли, так и по расходу газа, его температуре, влагосодержанию, вязкости и т.д. Это не позволяет создать универсальные пылеотделители и требует их ориентации на конкретные условия пищевых производств. Поэтому перспективу дальнейших исследований определяли следующие основные вопросы:

- разработка основных направлений интенсификации сухого и мокрого центробежно-инерционного пылеулавливания на основе их экспериментального исследования и теоретического анализа при максимальном учете физико-химических свойств улавливаемых пылевидных продуктов, их концентрации и режимных параметров отработанного воздуха;

- создание в результате этих исследований новых методов, технологических схем и устройств очистки отработанного воздуха от пылевидных продуктов, а также малозатратная модернизация действующего оборудования с целью существенного сокращения выброса в атмосферу пыли;

- разработка инженерных методов расчета и проектирования этих сухих и мокрых систем центробежно-инерционного пылеулавливания, их внедрение на пищевых предприятиях, обоснование экономической эффективности проведения мероприятий по совершенствованию средств очистки выбросов.

## 2. Исследование дисперсного состава пылевидных продуктов, содержащихся в технологических выбросах пищевых предприятий

Одним из главных параметров, определяющих эффективность очистки выбросов, является дисперсность аэрозольных частиц. В главе 2 приводятся результаты многочисленных экспериментальных исследований дисперсного состава пылевидных продуктов, содержащихся в отработанном воздухе (до и после очистки в циклонах) при производстве сухого молока, лактозы, СОМ, ЗЦМ, других сухих молочных продуктов, сушке хлебопекарных и кормовых дрожжей, сушке и охлаждении сахара-песка, переработке зерна. Кроме того, при помощи механического ситового анализа исследовался гранулометрический состав соответствующего готового продукта.

На рис. I (а) представлена микрофотография, характеризующая структуру и наиболее типичные по форме частицы пыли сухого молока, содержащегося на выходе отработанного воздуха из сушилки РС-1000. На рис. I (б, в) представлены микрофотографии пыли сахара-

песка (барабанная сушилка) и пыли сухой лактозы (сушилка Я4.0ГВ). В основном это обломки кристаллов сахара самой различной формы, причем на микрофотографии (8) хорошо виден целый кристалл лактозы ( $\alpha$ -формы).

Анализируя полученные по стандартной методике данные о дисперсном составе исследованных пылей и некоторые литературные данные, можно сделать вывод, что пылевидные пищевые продукты включают в себя частицы с очень широким диапазоном размеров. На основе проведенных исследований были сопоставлены характеристики дисперсности пылей различных сыпучих пищевых продуктов. Обобщенные данные дисперсности пылей представлены на рис. 2. Пыль отбиралась из воздушного потока аспирационных систем. Кривым на рис. 2 соответствуют: I - переработка семян подсолнечника на масло-жировых предприятиях; 2 - линия подготовки табака к ферментации; 3 - мучная пыль из воздуха, отсасываемого от вальцовочных станков на мельнице; 4 - после барабанной сушилки кристаллической глюкозы; 5 - в системе аспирации при производстве крахмала из кукурузы; 6 - пыль кормовых дрожжей в теплоносителе перед циклонами; 7 - пыль хлебопекарных дрожжей в отработанном воздухе перед циклонами; 8 - пыль сухой лактозы в отработанном воздухе перед циклонами; 9 - пыль сухого обезжиренного молока в отработанном воздухе перед циклонами; 10 - сахарная пыль в отработанном воздухе перед пылеуловителем; II - пылевидная фракция солода из системы пневмотранспорта росткоотбивной машины.

Представленные на рис. 2 кривые можно условно разбить на три группы. В первую входят пыли, образующиеся при производстве крахмала, сушке молока, лактозы, кристаллической глюкозы, табачная пыль. Для них характерно, что в процессе пылеобразования возникают частицы с размерами менее 60 мкм (причем более половины массы данной пыли составляют частицы размером менее 10 мкм). Во вторую группу входят пыли, образующиеся при сушке хлебопекарных и кормовых дрожжей, переработке семян подсолнечника, мучная, сахарная пыль. Гранулометрический состав в данном случае характеризуется наличием фракций крупнодисперсной пыли с размерами частиц более 100 мкм (около 30 % по массе), однако имеется и значительная доля мелкодисперсной пыли, а также пыль с размерами частиц менее 5 мкм. В третью группу входят пыли и порошки с незначительным содержанием мелкодисперсных фракций (частицы, имеющие размеры менее 100 мкм, составляют 5 %).

На основе приведенных данных дисперсного состава пылей можно

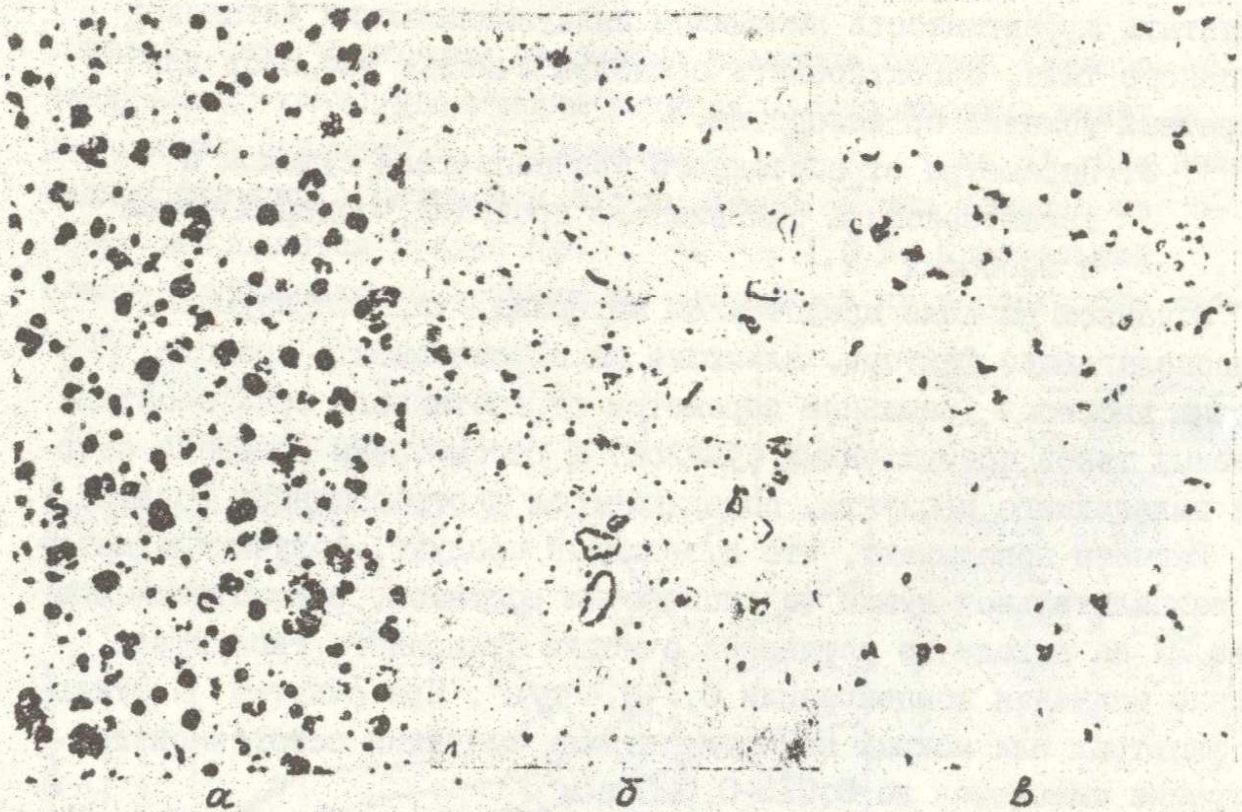


Рис. 1 Микрофотографии плесневидных фракций сухого продукта.

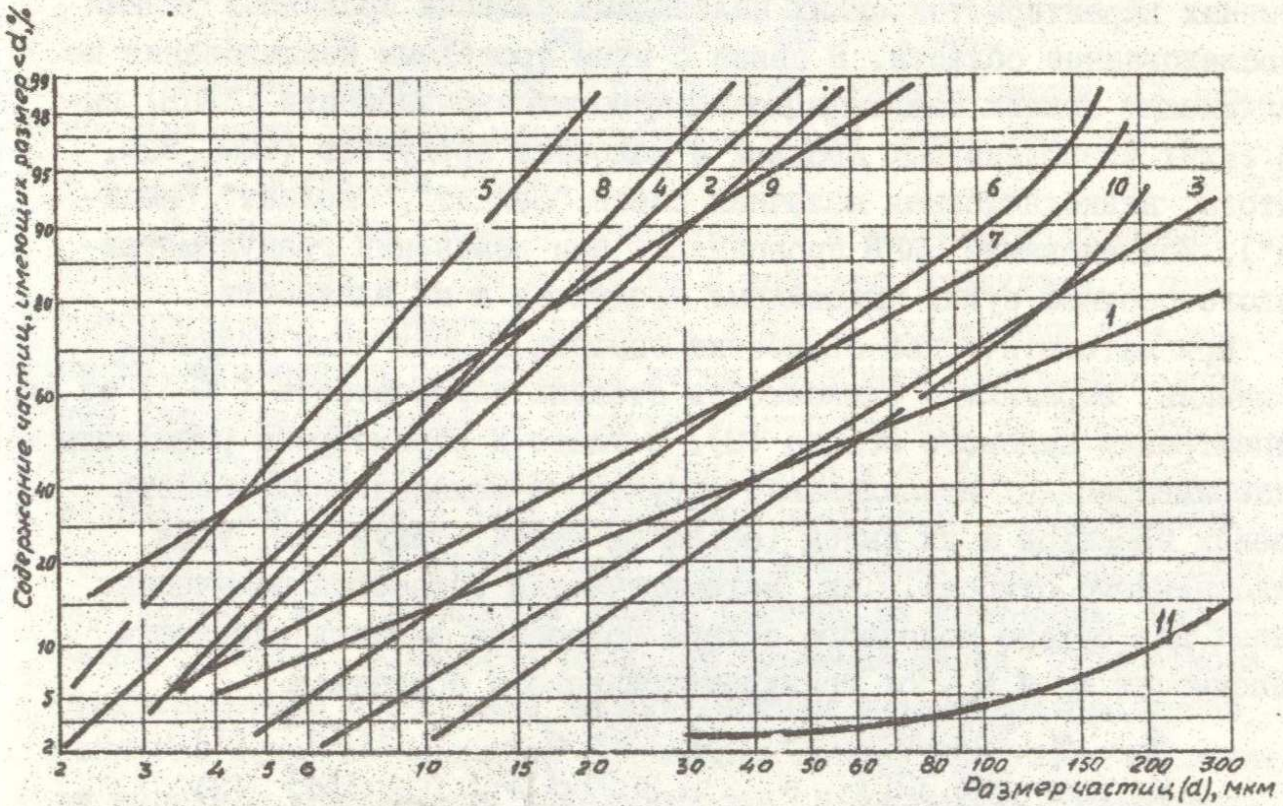


Рис. 2 Дисперсный состав плесневидного продукта, содержащегося в выбросах пищевых предприятий.

рассчитать эффективность имеющихся пылеулавливающих установок циклонного типа, проектировать средства очистки выбросов для конкретных условий производства.

### 3. Параметры отработанного теплоносителя сушилок и характеристика пылевидного продукта, содержащегося в выбросах

В данном разделе представлен материал, характеризующий основополагающие факторы, влияющие на эффективность средств очистки выбросов (режимные параметры отработанного теплоносителя основных типов промышленных сушилок) и рассмотрены основные свойства пылевидного продукта, содержащегося в отработанном воздухе.

Расчёты показывают, что пылевидный продукт, полученный методом распылительной сушки (с дисперсным составом, рассмотренным в главе 2) на выходе из установок очистки циклонного типа, имеет средние значения концентрации  $0,1-0,4 \text{ г/м}^3$ . При очистке в рукавных фильтрах или мокрых пылеотделителях значения остаточной концентрации снижаются до  $0,015-0,020 \text{ г/м}^3$ .

Анализ известных экспериментальных данных по исследованию взрывных характеристик сухих пылевидных пищевых продуктов выявил неисследованные области. В связи с этим проведены исследования по определению нижних концентрационных пределов взрываемости (НКПВ) пылей сухих хлебопекарных дрожжей и молочных продуктов (СМ, ЗЦМ, лактоза, низколактозная молочная смесь, "Белакт", "Эволакт", "Импитан"). Исследование НКПВ проводилось при изменении гранулометрического состава сухих пылевидных продуктов и их влажности.

При математической обработке опытных данных были получены уравнения, выражающие зависимость степени взрывчатости ( $e$ ) от концентрации пылевого облака ( $C$ ). В главе 3 рассмотрены результаты экспериментальных исследований структурно-механических свойств пищевых порошков и их пылей (объёмная масса, текучесть, угол естественного откоса). Так, математическая обработка полученных данных для сухого молочного сахара позволила выявить следующие зависимости  $M_0$  и  $M_{0I}$  от гранулометрического состава:

$$M_0 = 757,0699 - 0,2586 d + 0,0001d^2 \quad (1)$$

$$M_{0I} = 905,3213 - 0,3027 d + 0,0001d^2 \quad (2)$$

Уравнения (1)-(2) можно использовать при проектировании соответствующего технологического оборудования.

Исследования коэффициента текучести  $K_T$ , скорости истечения  $U_p$  и угла естественного откоса  $\alpha$  сухого молочного сахара

показал., что в широком диапазоне размеров частиц (включая пылевидные фракции) увеличение размера частиц порошка ведет к уменьшению значений  $K_T$  и увеличению  $\nu_p$  (рис.3). Для пылевидных фракций с размерами частиц менее 60 мкм течение из воронки наблюдается только при  $W = 1,0\%$ . При большей влажности пылевидные фракции не высыпались из воронки без вибрации.

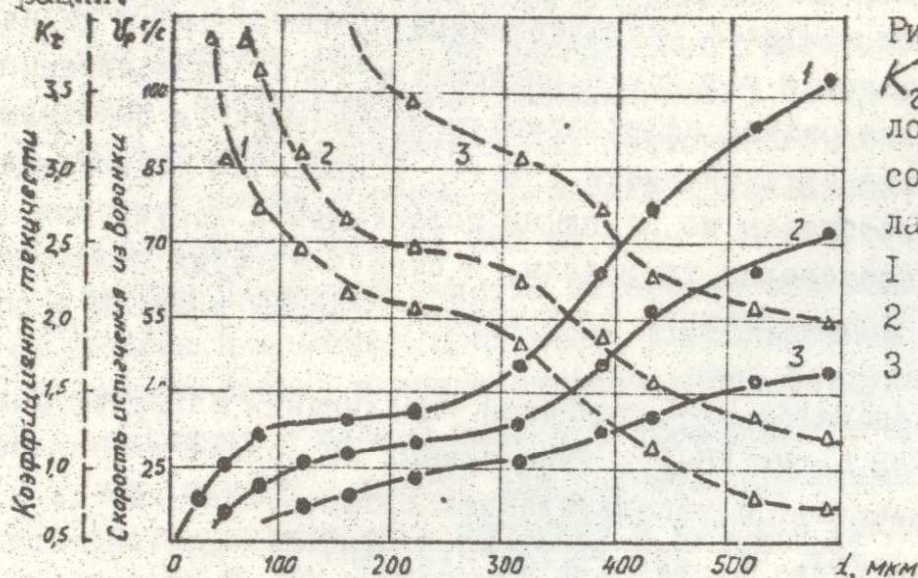


Рис.3 Зависимость  $K_T$  и  $\nu_p$  от гранулометрического состава сухой лактозы:

- 1 -  $W = 1\%$ ,
- 2 -  $W = 2,5\%$ ,
- 3 -  $W = 5,0\%$ .

Средние значения  $\alpha$  для частиц размером менее 400 мкм, составляющих основную массу порошка после сушки (при  $W = 2,5\%$ ), составляли  $32-34^\circ$ .

В завершении главы 3 представлены в систематизированной форме (отдельно для сушки молока и молочных продуктов, сушки хлебопекарных и кормовых дрожжей, сушки и охлаждения сахара-песка, хранения и переработки зерна) основные физико-химические свойства пылевидного продукта, поступающего на очистку. Соответствующий материал, представленный в обобщенном виде, включает для каждого вида пылевидных продуктов, образующихся при ведении перечисленных выше технологических операций, такие показатели, как дисперсный состав частиц, их плотность, взрывчатые свойства, влажность пыли, ее объемная масса, угол откоса. Представленные обобщенные характеристики пылевидных продуктов являются исходными данными для выбора потерь продукта, позволяют судить о способности пищевых пылей образовывать взрывоопасные концентрации с воздухом и определять время их нахождения в воздухе во взвешенном состоянии, а также степень опасности в санитарно-гигиеническом отношении.

#### 4. Центробежно-инерционный пылеотделитель для сухой очистки воздушных выбросов.

Учитывая, что при ведении целого ряда технологических процессов основным путем повышения эффективности очистки выбросов является совершенствование сухого центробежно-инерционного способа улавливания пылевидного продукта, а в настоящее время в пищевой промышленности наиболее многочисленным представителем данного метода очистки являются установки циклонного типа, определенный интерес представлял расчет эффективности применяющихся циклонов.

Методы расчета эффективности очистки в циклонах весьма многочисленны и разнообразны по исходным положениям и допущениям, причем наиболее достоверны те методы, в основу которых положены экспериментально установленные фракционные степени очистки в аппаратах.

Результаты расчетов эффективности улавливания сахарной пыли в циклонах НИИОГАЗ серии ЦН-15, выполненных на основе данных по ряду сахарных заводов (с использованием графического метода Алландера), показывают, что при  $d_{750} = 3,5$  мкм,  $\sigma = 2,5$  эффективность улавливания сахарной пыли (средний показатель  $d_{50} = 24$  мкм) составляет 95%.

По методу, предложенному Лайтом и Лифом выполнен расчет эффективности очистки отработанного воздуха в циклонах применительно к условиям сушки молочных продуктов. Анализируя полученные данные по фракционной эффективности улавливания пылевидного молочного сахара (сушилка Я4.0ГВ), можно сделать вывод о недостаточной эффективности улавливания частиц размером менее 5 мкм, составляющих около 80% по массе от общего количества неуловленной пыли. Теоретическое значение критического (минимального) диаметра частиц, полностью улавливаемых циклонами  $d_{кр} = 4,5$  мкм, а экспериментально в выбросах обнаружено незначительное количество частиц размером  $d = 5-8$  мкм, т.е. в действительности  $d_{кр}$  несколько выше.

Результаты расчета эффективности очистки в циклонах отработанного при сушке хлебопекарных дрожжей воздуха (методика НИИОГАЗ) говорят о неспособности циклонов обеспечить предельно допустимые концентрации пылевидного продукта ( $\eta = 93\%$ ). Расчеты показывают, что для достаточной степени очистки ( $\eta = 99\%$ ) требуется высокая фракционная эффективность в области частиц размером 2-5 мкм и  $\eta_p = 33\%$  для  $d = 1$  мкм.

Необходимость учета физико-химических свойств пылевидного продукта и режимных параметров несущей среды при центробежном улавливании частиц поставила задачу о моделировании процесса отделения пыли в криволинейном потоке с оценкой влияния на траекторию движения частиц ее плотности, размера, скорости потока, его температуры.

В диссертации рассматривается возможность применения уравнения Н.А. Фукса (для силы сопротивления несущей среды аэрозоля) при решении задачи по определению траекторий движения твердой фазы, поступающей из прямолинейного газотока в изогнутый в горизонтальной плоскости канал постоянного поперечного сечения.

Решение системы уравнений криволинейного движения частицы пыли проводилось на ЭВМ методом Гунге-Кутты применительно к процессам циклонной очистки отработанного теплоносителя при сушке молока и молочных продуктов, хлебопекарных и кормовых дрожжей, сахара-песка, очистки отработанного воздуха от мучной пыли на мельницах и чайной пыли при производстве кирпичного и байхового чая (исходные данные для расчета принимались, исходя из характеристик пылевидного продукта и несущей среды, исследованных в главах II, III). Найденные для случая равномерного по радиусу и углу  $\varphi$  поля скоростей несущей среды ( $U_{\varphi} = \text{const}$ ,  $U_c = 0$ ) решения системы уравнений позволяют вычислить на ЭВМ параметры движения частиц пыли в плоских горизонтальных криволинейных каналах (основной канал центробежно-инерционного пылеотделителя).

Моделирование процесса отделения пылевидных частиц в центробежно-инерционном пылеотделителе позволяет оценить влияние основных факторов на его эффективность очистки. В частности установлено, что эффективность пылеотделителя растет с увеличением крупности и плотности улавливаемых частиц пыли и скорости несущей среды и уменьшается с увеличением диаметра аппарата (в данном случае важны найденные конкретные показатели для перечисленных выше пищевых пылей соответствующих производств).

Показано, что расстояния, на которые удаляются частицы от центра пылеотделителя при повороте потока на  $180^\circ$ , достаточны для их отделения только при размерах частиц более 30-50 мкм (в зависимости от диаметра пылеотделителя). Анализ полученных данных (рис. 5) говорит о том, что размер частиц влияет на траекторию в большей степени, чем их плотность. Кроме того, пылевидные пищевые продукты, обладая значительно меньшей плотностью, чем другие виды пыли, менее эффективно улавливаются центробежным способом.

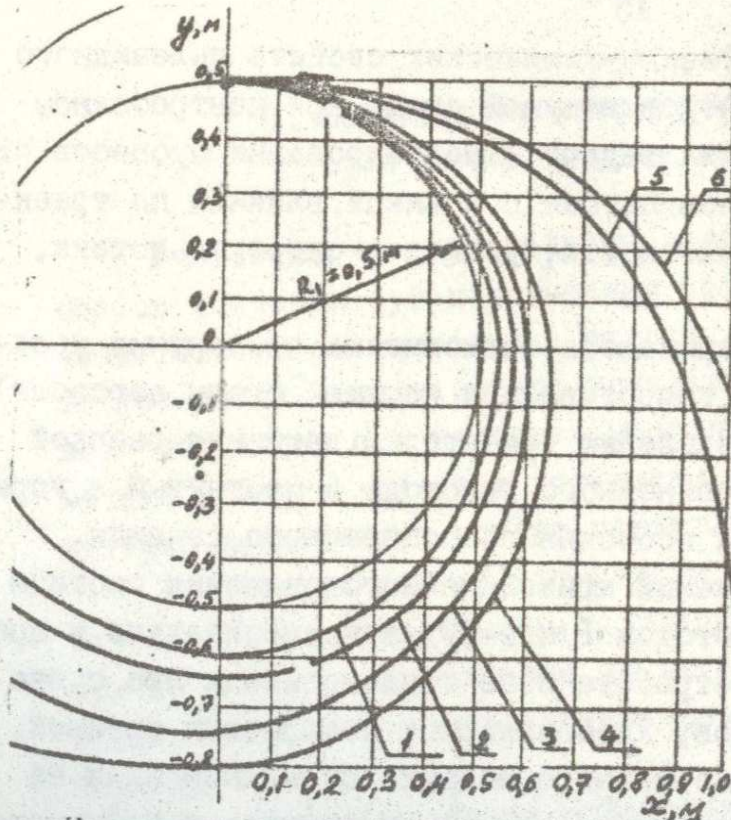


Рис. 5 Траектории частиц  
(канал радиусом

$R_1 = 0,5 \text{ м}$ ):

- 1 -  $d = 26 \text{ мкм}$ ;  
 $\rho_2 = 1060 \text{ кг/м}^3$ ;
- 2 -  $d = 26 \text{ мкм}$ ;  
 $\rho_2 = 1600 \text{ кг/м}^3$ ;
- 3 -  $d = 50 \text{ мкм}$ ;  
 $\rho_2 = 1060 \text{ кг/м}^3$ ;
- 4 -  $d = 50 \text{ мкм}$ ;  
 $\rho_2 = 1600 \text{ кг/м}^3$ ;
- 5 -  $d = 150 \text{ мкм}$ ;  
 $\rho_2 = 1060 \text{ кг/м}^3$ ;
- 6 -  $d = 150 \text{ мкм}$ ;  
 $\rho_2 = 1600 \text{ кг/м}^3$ .

Изменение температуры несущей среды изменяет ее плотность и вязкость, что в свою очередь оказывает влияние на траектории движения частиц и на эффективность их отделения от потока. Учитывая, что в процессе сушки пищевых продуктов температура очищаемого отработанного воздуха сушилок может оказывать влияние на траектории движения пыли в центробежном пылеотделителе, произвели расчет на основе решения системы уравнений криволинейного движения частиц при изменении  $T$  от 20 до 120 °С. Анализ полученных данных показал, что повышение  $T$  ведет к некоторому уменьшению  $\eta_{\text{ф}}$ , причем эта закономерность сохраняется и при дальнейшем повышении температуры потока. Так, для пыли сухого молока (рис. 6) повышение  $T$  от 20 до 100 °С сопровождается уменьшением  $\eta$  в среднем на 4–8 % в широком диапазоне размеров частиц от 10 до 40 мкм.

Для экспериментальной проверки полученных теоретическим расчетом данных проведены лабораторные испытания и исследования на различных режимах работы разработанного нами центробежно-инерционного пылеотделителя для сухой очистки выбросов. Анализ проблемы показал, что из всех существующих устройств сухого инерционного пылеулавливания наиболее эффективными и в то же время компак-

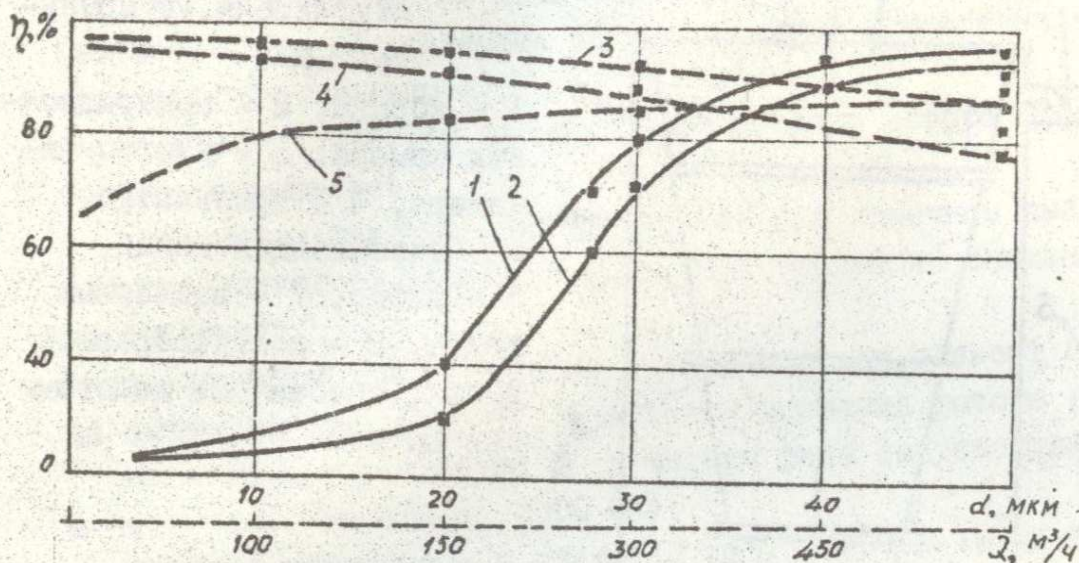


Рис. 6 Эффективность улавливания сухого молока: 1 - циклон,  $T = 20^\circ\text{C}$ , 2 - циклон,  $T = 100^\circ\text{C}$ , 3, 4 - сухой пылеотделитель ( $\frac{\omega^2 R_0}{g} = 2 \cdot 10^3; 10^5$ ), 5 - циклон СК-ЦН-34.

тными являются аппараты, использующие центробежные силы, развиваемые роторами с принудительным приводом. Уровень центробежных сил в данном случае может быть достаточно высоким, вследствие чего достигается высокая эффективность очистки, а конструктивное исполнение аппарата позволяет очищать потоки с высокими концентрациями пыли. Однако в известных конструкциях ротационных пылеотделителей высокая эффективность очистки обеспечивается лишь при умеренных расходах воздуха. Разработанные нами на уровне изобретений установки, имеющие узел контактирования фаз, реализующий возможность сочетания повышенных расходов воздуха, а также изменения расходов воздуха по времени с достаточно высокой степенью его очистки, испытаны применительно к условиям технологии сыпучих пищевых продуктов (рис. 7).

Экспериментальные исследования гидравлического сопротивления разработанного пылеотделителя позволяют судить о зависимости  $\Delta P$  от расхода воздуха. С увеличением расхода воздуха  $\Delta P$  увеличивается, причем в области малых расходов оно превышает сопротивление эквивалентного циклона. Так, при расходах воздуха более  $350 \text{ м}^3/\text{ч}$  гидравлическое сопротивление обоих аппаратов примерно одинаково (рис. 8).



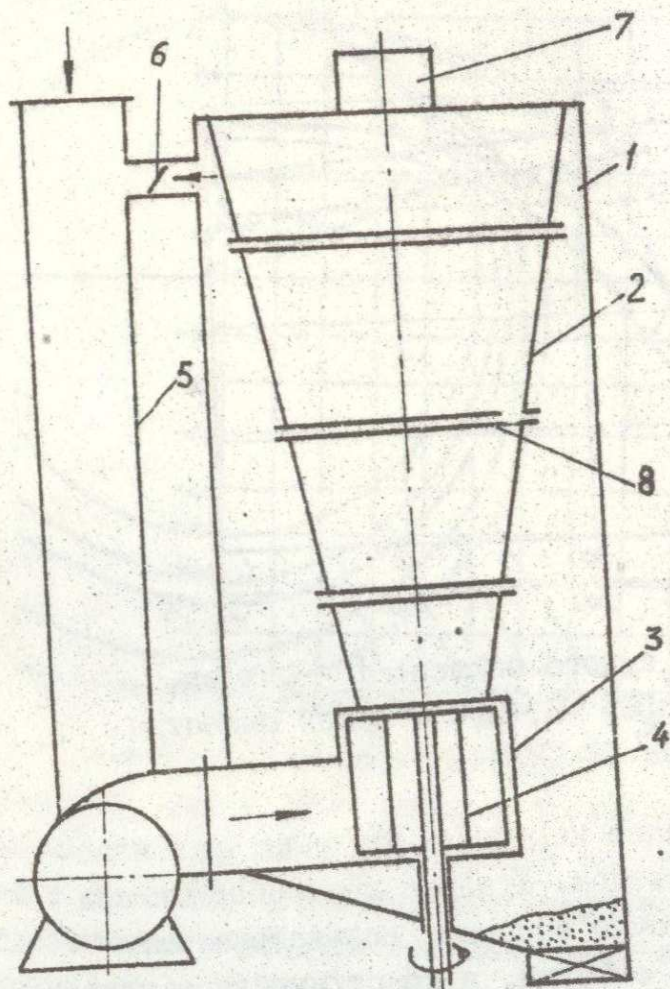


Рис. 7 Схема сухого пылеотделителя (с крыльчаткой):

1 - корпус, 2 - сепарационная камера, 3 - улиточная камера, 4 - крыльчатка, 5 - всасывающая линия, 6 - шибер, 7 - выхлопная труба, 8 - кольцеобразные диски, снабженные щелевыми отверстиями.

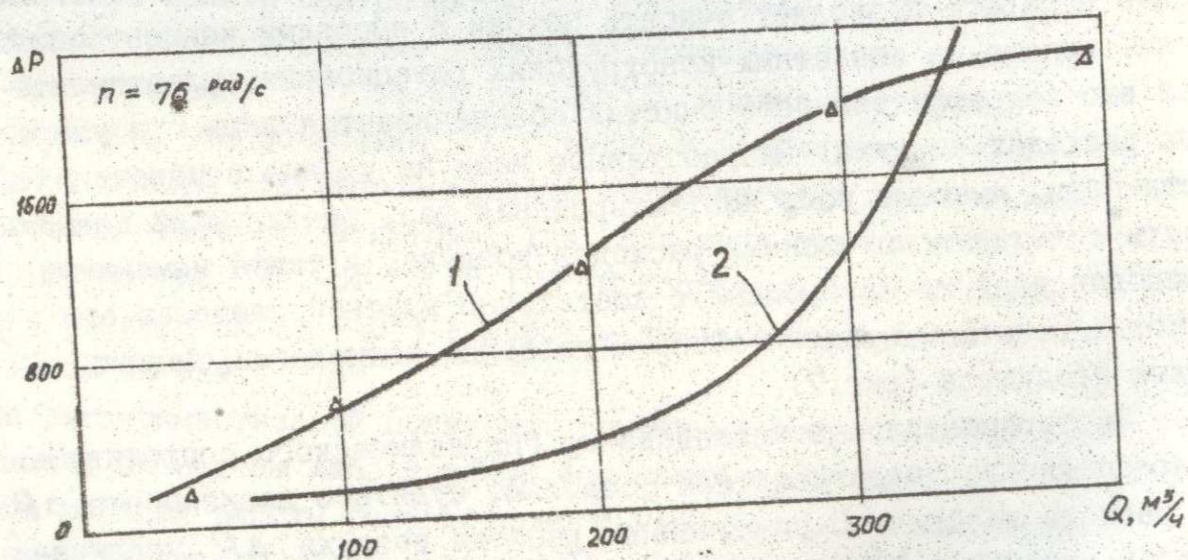


Рис. 8 Зависимость  $\Delta P$  от расхода воздуха:  
1 - пылеотделитель с крыльчаткой, 2 - циклон СК-ЦН-34.

На основе анализа экспериментальных данных (рис. 6) результатов исследования эффективности улавливания пыли СОМ ( $d_{50} = 23 \text{ мкм}$ ,  $\sigma = 3,1$ ) в разработанном пылеотделителе (при изменении чисел  $Re$  в диапазоне 465-1380) можно сделать следующие выводы:

- при изменении начальной концентрации пыли в 5-6 раз степень очистки практически не изменялась и была достаточно высокой (естественно, что конечное пылесодержание в массевых единицах существенно изменялось);
- с увеличением частоты вращения лопаточного ротора эффективность очистки повышалась;
- с увеличением расхода очищаемого воздуха конечное пылесодержание увеличивалось незначительно (при тенденции снижения степени очистки);
- гидравлическое сопротивление пылеотделителя зависит от расхода очищаемого воздуха  $Q$  и частоты вращения ротора  $n$  (при  $n = 12$  1/с изменение  $Q$  в четыре раза сопровождалось повышением  $\Delta P$  от 450 до 2000 Па).

Обобщая полученные в главе IV результаты исследований, можно сделать вывод о вполне удовлетворительном совпадении результатов экспериментальных исследований процесса центробежной сепарации пищевых пылей с теоретическими расчетами. Разработанный центробежно-инерционный пылеотделитель для сухой очистки выбросов характеризуется следующим:

1. Установка сепарационного узла в виде лопаточного ротора с центробежным стаканом-пылеотделителем существенно повышает эффективность очистки за счет процессов сепарации частиц, протекающих в роторе, причем эффективность очистки может достигать 99 %.
2. Предельный размер частиц, улавливаемых в ротационном сепараторе при указанной выше эффективности, составляет  $1,5 + 2$  мкм.
3. Степень очистки пылеотделителя слабо зависит от величины расхода очищаемого воздуха и во всем диапазоне варьируемых во время испытаний расходов превышает эффективность очистки в циклоне. При отключенном роторе (турбинный режим) показатели эффективности пылеулавливания находятся на уровне, соответствующем обычному прямооточному циклону.
4. Конструктивное исполнение разработанного сепарационного узла позволяет обеспечить высокую эффективность очистки в достаточно широком диапазоне меняющихся расходов воздуха, что существенно расширяет возможности применения аппарата в технологии сыпучих пищевых продуктов, включая те случаи, когда обычные циклоны применять не представляется целесообразным.

### 5. Центробежно-инерционный пылеотделитель для мокрой очистки газа.

Анализ проблемы мокрой очистки выбросов применительно к пищевым пылям и соответствующим технологиям показал, что во многих случаях экономически перспективно применение мокрых центробежно-инерционных пылеотделителей с внутренней циркуляцией очищающей жидкости и самоорошением. На основе обобщения имеющегося материала разработано новое направление в конструировании установок мокрой очистки с внутренней циркуляцией жидкости, обеспечивающее повышение эффективности улавливания пылевидных пищевых продуктов и их возврат в технологический процесс (обычно в виде раствора).

В главе У рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований мокрого центробежно-инерционного пылеотделителя с характерным решением узла контактирования: фаз:

I вариант (рис. 9) – при организации перемешивающегося взвешенного слоя (за счет подвода газа через вращающиеся патрубки);

II вариант (рис. 10) – при организации самоорошения (за счет тангенциального ввода газа, раскручивающего лопастное устройство).

Чтобы достаточно надежно охарактеризовать механизм отделения пыли в аппарате и процесс изменения его гидравлического сопротивления исследования этих показателей проводили в зависимости от ряда факторов (конструктивных и режимных параметров аппарата, параметров очищаемого воздуха). Задачу по определению оптимальных конструктивных и режимных параметров аппарата решали с использованием метода статистического планирования экспериментов.

Исследование динамики контактирования фаз (гидравлическое сопротивление, высота газожидкостного слоя, профиль скоростей, относительный брызгонос) проведено с использованием теории подобия и размерностей.

Математическое описание изменения гидравлического сопротивления ( $\gamma$ , Па) аппарата с организацией перемешивающегося взвешенного слоя за счет подвода газа через вращающиеся патрубки (рис. 9) произведено методом статистического планирования эксперимента.

Независимые переменные:  $x_1$  – глубина погружения патрубков в воду (0 – 20 см);

$x_2$  – угловая скорость патрубков (10 – 90 рад/с);

$x_3$  – количество патрубков (1 – 4 шт.).

При обработке результатов получено уравнение регрессии:

$$y = 411,04 + 50,04 x_1 - 46,11 x_3 - 103,01 x_2. \quad (3)$$

Значимость коэффициентов оценивали с помощью критерия Стьюдента (при уровне значимости 0,05). Адекватность уравнения (3) физической модели исследуемых величин проверялась путем сравнения расчетного значения критерия Фишера с его табличным значением. В работе приведен анализ уравнения (3).

В работе рассмотрены закономерности формирования газожидкостного слоя на основе измерения профиля скоростей воздушного потока. Оценку степени неравномерности распределения скоростей производили по методу Идельчика И.Е. Применительно к полному сечению исследуемого аппарата находили коэффициенты количества движения  $M_K$ . На основе анализа расчетных значений  $M_K$  (1,4 ÷ 1,1) получен симплекс геометрического подобия  $D_{ан.}/D_{учеб} = 1,8 ÷ 2,0$ .

В результате обработки опытных данных получен явный вид критериального уравнения, описывающего процесс образования взвешенного слоя в аппарате:

$$\frac{H_g}{D} = 0,451 \left( \frac{H_0}{D} \right)^{0,95} \left( \frac{v_r}{v_r \cdot g} \right)^{0,13}. \quad (4)$$

Уравнение (4) справедливо при  $\frac{H_g}{D} = 0,7 ÷ 1,8$ ;  $v_r/v_r \cdot g = 5 \cdot 10^3 - 10^6$ , то есть с момента возникновения над вращающимися патрубками взвешенного слоя. Погрешность уравнения (4) не более 14 %.

На гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя решающее влияние оказывает вращение патрубков, глубина их погружения в жидкость и скорость воздушного потока, влияние остальных факторов можно учесть введением коэффициента. После обработки данных получено следующее уравнение для расчета гидравлического сопротивления взвешенного слоя:

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot v_r^2} = 2,2 \cdot 10^5 \left( \frac{\omega^2 D_{ан.э}}{g} \right)^{-0,18} \left( \frac{v_r \cdot D_{ан.э}}{v_r} \right)^{-0,48} \left( \frac{H_g}{D} \right)^{0,29}. \quad (5)$$

Уравнение (5) справедливо при  $H_g/D = 1 ÷ 3,5$ ;  $Re_r = 6 \cdot 10^4 ÷ 20 \cdot 10^4$ ;  $Fr_m = 10-800$ . Погрешность не превышает 12 %.

В работе приводится анализ данных, связанных с выявлением оптимального гидродинамического режима работы аппарата.

При обработке экспериментальных данных оказалось, что опытные точки для зависимости  $\eta = f(H_g)$  хорошо укладываются на прямую линию в логарифмической сетке координат, что позволяет для расчета предложить уравнение  $\eta = A \cdot H_g^B$ . В работе представлены коэффициенты A и B для различных условий работы установки.

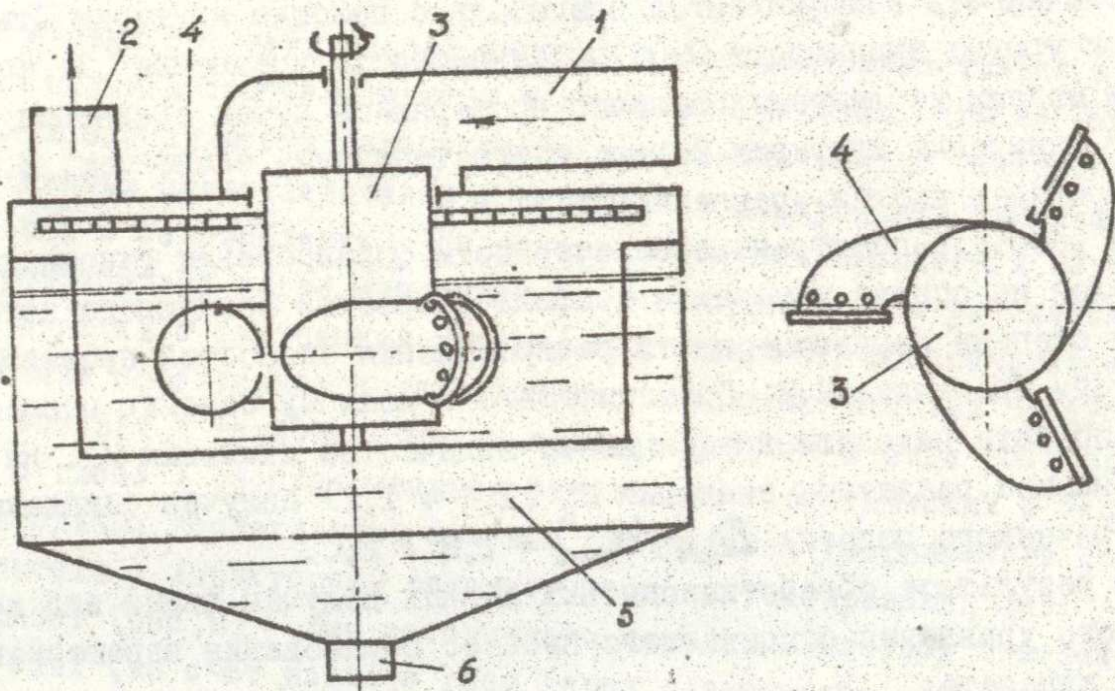


Рис. 9 Мокрый пылеотделитель /вариант I/ :  
 1- входной патрубок, 2- выходной патрубок, 3- цилиндрическая камера с приводом, 4- радиальные патрубки с выпускными отверстиями, 5- отражательные перегородки.

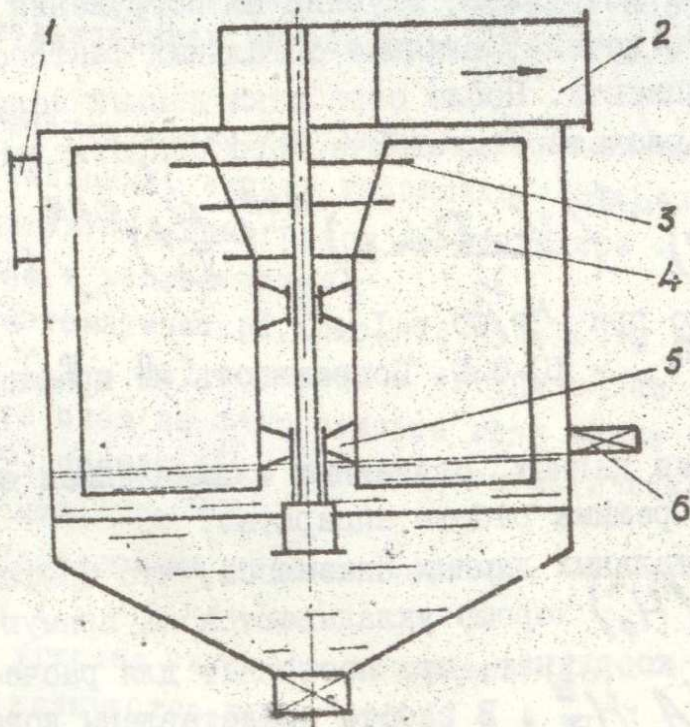


Рис. 10 Мокрый пылеотделитель /вариант II/ :

- 1- входная улитка,
- 2- выходная улитка,
- 3- стакан центробежного дискового распылителя,
- 4- лопасти, 5- крыльчатка,
- 6- регулятор уровня.

С использованием метода статистического планирования эксперимента описали изменения степени очистки аппарата. Независимыми переменными в данном случае были:  $x_1$  - глубина погружения патрубков в жидкости (0-30 см);  $x_2$  - угловая скорость патрубков ( $^\circ$ )-90 рад/с);  $x_3$  - угол разворота патрубков (30-90  $^\circ$ );  $x_4$  - диаметр сечения патрубков (2-10 см).

Уравнение регрессии, адекватно описывающее эксперимент, имеет следующий вид:

$$y = 85,3 + 2,9x_1 + 4,8x_2 + 4,8x_3x_1 - 6,2x_4x_2 \quad (6)$$

С помощью уравнения (6) решена задача определения оптимальных условий процесса путем вычисления максимальной величины степени очистки в изученных интервалах изменения параметров.

Было исследовано влияние режимных параметров запыленного воздушного потока на фракционную степень улавливания шлефовидных пищевых продуктов. При этом учитывались параметры реального отработанного воздуха в производственных условиях.

Независимыми переменными были:  $x_1$  - медианный диаметр частицы (1-60 мкм);  $x_2$  - концентрация пыли на входе в аппарат (5-2000 мг/м<sup>3</sup>);  $x_3$  - влагосодержание воздушного потока (30-500 г/кг сухо).

Полученное в результате реализации матрицы планирования уравнение регрессии, адекватно описывающее процесс, имеет следующий вид:

$$y = 73,4 + 23x_1 - 4,8x_2 + 5,5x_3 - 4,0x_1x_3 \quad (7)$$

В работе приводится анализ полученного уравнения.

Механизм отделения частиц в аппарате можно разбить на два этапа:

- инерционное осаждение пыли при выходе воздушного потока из вращающихся патрубков в газожидкостный слой;
- турбулентно-инерционное осаждение частиц при хаотическом движении газа во взвешенном слое.

По Фуксу Н.А. инерционное осаждение ("механизм удара"), имеющее место в нашем случае на первом этапе, определяется критерием Стокса. Вид полученной нами функции близок к экспоненте:

$$\eta' = 1 - \exp(-23,8 K \cdot stk), \quad (8)$$

где  $K = 0,4 + \frac{97,3}{(1+d)^{2,8}}$  - опытный коэффициент.

$$stk = \frac{d^2 \rho_c v_0'^2}{18 \mu_f D} \quad - \text{критерий Стокса (0,0015 \pm 2,35)}$$

На второй стадии улавливание пыли зависит от поверхности контакта фаз, причем дисперсность частиц уже известна - это частицы, не уловленные в первой стадии (менее 5 мкм). Обработка опытных

Данных позволила получить следующую зависимость:

$$\eta' = 1 - \exp(-0,47 \frac{H_0}{D}). \quad (9)$$

Общая эффективность обеих стадий очистки может быть описана уравнением:

$$\eta = 1 - (1 - \eta')(1 - \eta''). \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (10) значения  $\eta'$  и  $\eta''$ , получим окончательно:

$$\eta = 100 \left[ 1 - \exp \left\{ - \left( 0,4 + \frac{97,3}{(1+d)^{2,8}} \frac{d^2 \rho_2 v_0'}{18 M_r D} - 0,47 \frac{H_0}{D} \right) \right\} \right]. \quad (11)$$

Уравнение (11) справедливо для значений  $\frac{H_0}{D} = 0,3 \div 2,5$ . Погрешность вычисления не превышает 10,5%.

Отдельно по стандартным методикам были проведены аналогичные исследования и испытания аппарата с организацией самоорошения за счет тангенциального ввода газа, раскручивающего лопастное устройство (рис.10).

Гидравлическое сопротивление аппарата возрастает с увеличением частоты вращения лопастей и глубины их первоначального погружения в очищающую жидкость. На основе полученных данных построены зависимости  $E_{\text{ш}} = \Delta P_{\text{ш}} / \rho_r v_r^2$  от относительной глубины погружения узла контактирования фаз для разработанных аппаратов (по варианту I и варианту II) при различных числах  $Re_{\text{шкф}}$  (рис.11).

$$E_{\text{ш}} = \Delta P_{\text{ш}} / \rho_r v_r^2$$

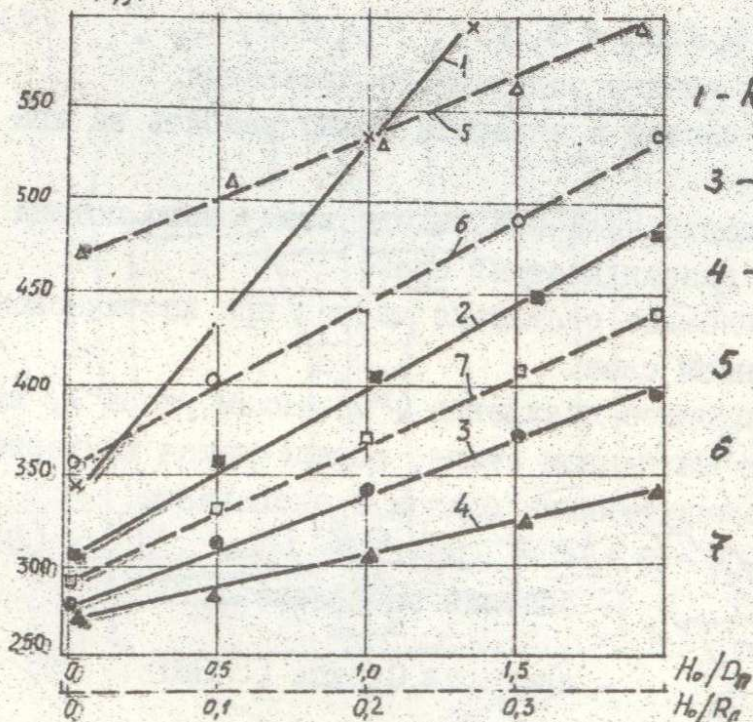


Рис.11 Зависимость  $E_{\text{ш}}$  от  $H_0/D_n$  и  $H_0/R_n$ :

- 1 -  $Re_{\text{шкф}} = 0$ ; 2 -  $Re_{\text{шкф}} = 4,6 \cdot 10^4$ ;
- 3 -  $Re_{\text{шкф}} = 9,3 \cdot 10^4$ ;
- 4 -  $Re_{\text{шкф}} = 15 \cdot 10^4$ ;
- 5 -  $Re_{\text{шкф}} = 15 \cdot 10^4$ ;
- 6 -  $Re_{\text{шкф}} = 9,3 \cdot 10^4$ ;
- 7 -  $Re_{\text{шкф}} = 4,6 \cdot 10^4$ .

Установлены общие закономерности и общий характер изменения брызгоуноса в исследованных аппаратах. Максимальный брызгоунос возникает при неполном погружении патрубков (для аппарата по ва-

рианту I при  $H_0/D_n = 0,5$ ), или незначительном погружении лопастного устройства (для аппарата по варианту II при  $H_0/R_n = 0,1$ ). При увеличении угловой скорости УКФ и скорости воздушного потока на входе в аппараты брызгонос увеличивается (рис. 12). Соответствующие зависимости для разработанных аппаратов были аппроксимированы следующими уравнениями:

$$U_1 = \frac{H_0}{D_n \left[ 3,7287 \left( \frac{H_0}{D_n} \right)^2 - 4,5864 \left( \frac{H_0}{D_n} \right) + 0,6970 \right]}, \quad (12)$$

$$U_2 = \frac{H_0}{R_n \left[ 0,0373 \left( \frac{H_0}{R_n} \right)^2 + 0,0714 \left( \frac{H_0}{R_n} \right) - 0,0017 \right]}. \quad (13)$$

Установлена зависимость эффективности очистки  $\eta$  от относительной глубины погружения лопастей  $H_0/R_n$  и от комплекса  $X = n d_{\text{УКФ}} / v$ , определяющего режим работы УКФ. Увеличение комплекса  $X$  ведет вначале к значительному увеличению  $\eta$ , затем (при  $X > 2,5$ ) степень очистки не возрастает (кривые эффективности 1, 2 рис. 13 достигают насыщения). Установлено, что для мелкодисперсных фракций пыли (испытания проводили на сахарной пыли и пыли лактозы) увеличение значений  $\eta$  связано с увеличением поверхности контакта фаз за счет уплотнения структуры газожидкостного слоя при увеличении скорости вращения УКФ.

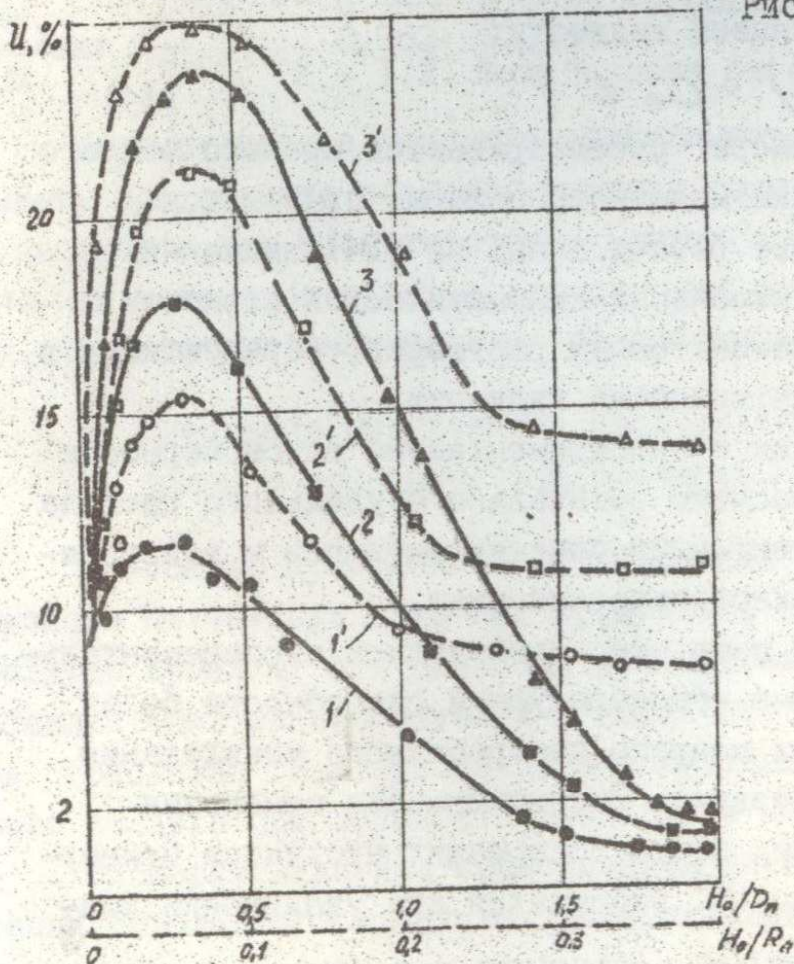


Рис. 12 Зависимость  $U$  от  $H_0/D_n$  и  $H_0/R_n$

$$1, 1' - Re_{\text{УКФ}} = 6,7 \cdot 10^4;$$

$$2, 2' - Re_{\text{УКФ}} = 9,3 \cdot 10^4;$$

$$3, 3' - Re_{\text{УКФ}} = 15 \cdot 10^4.$$

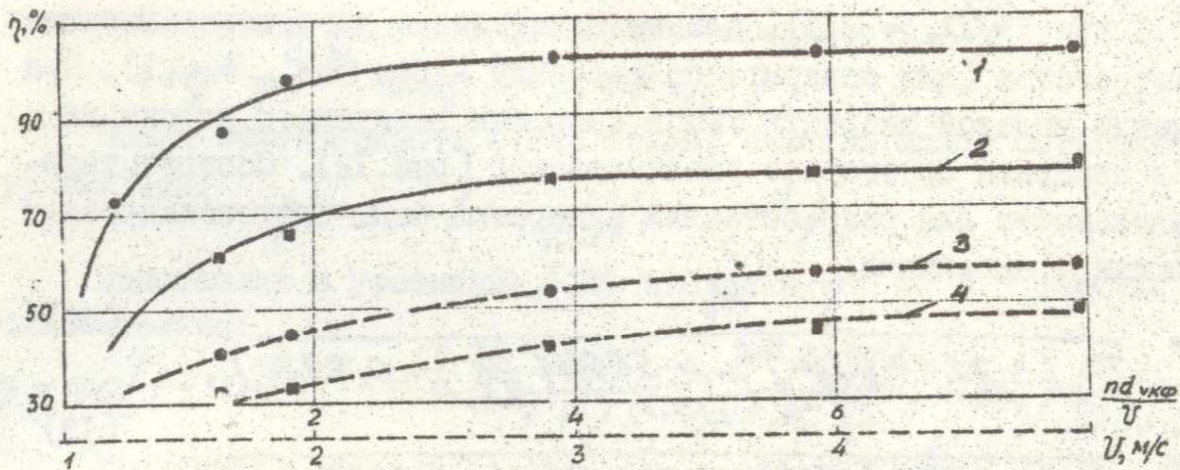


Рис. 13 Зависимость  $\eta$  от комплекса  $\frac{nd_{уко}}{U}$ , определяющего режим работы УКО и скорости воздуха:

1, 3 - сахарная пыль; 2, 4 - пыль сухой лактозы.

Отдельно рассмотрены вопросы, связанные с влиянием увеличения концентрации сухих веществ в очищающей жидкости пылеотделителя (с увеличением времени работы с момента пуска) на ее пенообразующую способность, вязкость и поверхностное натяжение, что оказывает влияние на эффективность очистки выбросов.

На основе математического описания процессов, происходящих в очищающей жидкости при поглощении ею пылевидного продукта, получена формула для расчета концентрации сухих веществ в воде пылеотделителя с внутренней циркуляцией жидкости:

$$C_t = \left( C + \frac{K}{M} \right) \left( 1 - e^{-\frac{M}{V} t} \right) + C_0 e^{-\frac{M}{V} t} \quad (14)$$

В работе в качестве примера рассматривается процесс мокрого улавливания из выбросов сушилки молочного сахара, приводятся уравнения, по которым на основе рассчитанных по (14) значений определяется соответствующее изменение кинематической вязкости и поверхностного натяжения водно-лактозных растворов, образующихся в пылеотделителе с внутренней циркуляцией жидкости.

Установленные теоретически и экспериментально закономерности могут быть использованы при расчете оптимального удельного расхода жидкости, обеспечивающего эффективную очистку выбросов и возвращение уловленного продукта в технологический цикл.

Отдельно, по стандартной методике, проводились экспериментальные исследования по определению пенообразующей способности белок содержащих пылей в процессе их мокрого центробежного улавливания из отработанного сушильного воздуха. Закономерности изменения

объема пены для различных сухих белок содержащих продуктов примерно одинаковы. Рост объема пены  $V_n$  наблюдался при увеличении кон-

центрации сухих веществ в растворе  $C$ , причем в основном для каждого фиксированного значения температуры  $T$  раствор с большими значениями  $C$  имел большую пенообразующую способность. Увеличение  $T$  ведет к увеличению  $V_n$ , причем  $V_n$  достигает своих максимальных значений в области определенных значений  $T$ .

Характер поведения зависимости кратности пены  $K$  от  $C$  и  $T$ , а также предварительные расчеты показали, что для описания экспериментальных данных можно использовать полиномиальную зависимость:

$$K = \sum_{i=0}^2 a_i C^i \sum_{j=0}^2 b_j T^j \quad (15)$$

Коэффициенты  $a_i$  и  $b_j$  в уравнении (15) для каждого сухого продукта были определены на ЭВМ СМ 1420 методом наименьших квадратов (см. табл.).

Коэффициенты уравнения (15)	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$b_0$	$b_1$	$b_2$
Инпитан	0,12	0,082	-0,0014	-1,8	0,13	-0,0012
Белакт	0,6	0	0	0,565	0,0145	0
Низколактозная молочная смесь	0,12	0,082	-0,0014	-1,8	0,13	-0,0013
ЗЦМ	0,396	0,0656	-0,00112	-2,856	0,129	0
Сволакт	0,963	0,0368	0	-1,8	0,128	-0,00113
СОМ	K = 1,2. Зависимости от C и T не выявлено.					

Математическое описание экспериментальных данных следует учитывать при расчете соответствующего технологического оборудования, в частности при проектировании мокрых средств очистки выбросов сушильных установок с целью определения режимных параметров их работы, исключающих значительное пенообразование.

#### 6. Внедрение результатов исследований в производство и их технико-экономическое обоснование.

На основе проведенных исследований основных физико-химических свойств пылевидных молочных продуктов, содержащихся в отработанном воздухе сушилок, его режимных параметров и современной практики эксплуатации пылеуловителей в нашей стране и за рубежом разработана отраслевая "Инструкция по эксплуатации систем очистки отработанного воздуха при распылительной сушке молочных продуктов".

Экспериментальные исследования дисперсного состава и концентрации пылевидного продукта, содержащегося в выбросах сушилок, обобщение данных по потерям продукта с выбросами при сушке молочных

продуктов и анализ соответствующей литературы по нормированию выбросов предприятиями послужили основой разработанной "Инструкции по определению плановых показателей по охране атмосферного воздуха и расчету предельно допустимых выбросов в молочно-консервной промышленности".

Обе инструкции утверждены ВНИО "Союзконсервмолоко" для предприятий отрасли и внедрены в производство. Общий годовой экономический эффект от внедрения инструкций на предприятиях отрасли 261,75 тыс.руб.

Мокрый пылеотделитель внедрен в качестве средства улавливания пылевидных фракций, содержащихся в отработанном воздухе линии сушки молочного сахара Я4-ОГВ Воронежского молочного завода № 2. При гидравлическом сопротивлении 800 Па он имеет высокую степень очистки ( $\eta = 97-98\%$ ), вследствие чего потери сухого молочного сахара снижаются с 2,5 кг/ч до 0,035 кг/ч, надежно обеспечиваются санитарные нормы. Экономический эффект - 6,8 тыс.руб. в год на одну сушилку.

Положительный опыт эксплуатации разработанного аппарата (а.с. 1212513) применительно к процессу сушки продукта с небольшим расходом отработанного теплоносителя (до  $1 \text{ м}^3/\text{с}$ ), а также то, что в настоящее время быстрыми темпами увеличивается производство малогабаритных сушильных установок (А1-ФМУ, СГ-500, Я2-ОНЕ, Я2-ОНЖ, А1-ОРЗ), которыми будут оснащаться низовые заводы, расположенные в районных центрах, говорит о перспективности применения аппарата именно для данного типа сушильного оборудования. В настоящее время планируется производство разработанного мокрого пылеотделителя в НИО "Волгомясомолмаш" для оснащения им сушилок с расходом отработанного воздуха до  $1 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Показано, что наиболее перспективным путем модернизации действующих сушильных установок для отечественных предприятий на ближайшее десятилетие является совершенствование вспомогательного оборудования сушилок, позволяющее непосредственно решать вопросы повышения их производительности, сокращения потерь сухого продукта, снижения расхода энергии. В главе VI рассмотрены основные вопросы модернизации сушильных установок за счет конструктивных изменений в схеме отвода отработанного воздуха из сушильной камеры и его очистки в циклонах.

В результате анализа выполненных экспериментальных исследований режимных параметров систем циклонной очистки отработанного теплоносителя сушильной установки НИРО АТОМАЙЗЕР (Балтский молочно-консервный комбинат детских продуктов, Одесской обл.), а также про-

веденных работ по совершенствованию конструктивной схемы подвода воздуха в циклоны с целью улучшения их аэродинамических характеристик получено значительное снижение потерь сухого продукта "Детолакт" с выбросами в атмосферу. Годовой экономический эффект от внедрения - 122,4 тыс.руб.

Аналогичные работы выполнены на Сибайском (Башкирская АССР) молочноконсервном комбинате детского питания (сушилка АНГИДРО, система пневмотранспорта и аспирации). Экономический эффект 75 тыс.руб. в год.

В условиях сушки молочных продуктов разработаны способы модернизации циклонов с целью исключения отложений продукта на их внутренних стенках (что особенно актуально для жиросодержащих пылевидных продуктов). Модернизация циклона, заключающаяся в оснащении его конической части скребковым механизмом (разработано несколько видов исполнительных механизмов) с приводом, выполнена при работе сушильной установки РС-1000 Россошанского молочного комбината. Результаты испытаний показали эффективность и надежность удаления налипавшей пыли ЗЦМ, закупорки циклона не наблюдалось, выгрузку уловленного продукта осуществляли непрерывно (разработана техдокументация и техническая характеристика механизма удаления налипшего продукта).

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований предложен ряд технических решений, новизна которых подтверждена 14 авторскими свидетельствами СССР.

### Выводы

1. Впервые на базе исследованных нами основных физико-химических, структурно-механических свойств (дисперсный состав, степень взрывчатости, текучесть, угол естественного откоса, объемная масса и т.д.), а также режимных параметров запыленного отработанного воздуха осуществлено комплексное изучение факторов, влияющих на эффективность очистки выбросов для широкого диапазона видов пылей, образующихся при производстве сухого молока и молочных продуктов, сахара-песка, сухих хлебопекарных и кормовых дрожжей, переработке зерна; с учетом экологических и санитарно-гигиенических требований обоснована необходимость повышения регламентированной эффективности очистки отработанного воздуха при ведении указанных выше технологических процессов.

2. С использованием положений механики аэрозолей разработана математическая модель и основы расчета отделения пыли в плоском

горизонтальном криволинейном канале с оценкой влияния на траекторию движения частицы ее плотности, размера, скорости потока, его температуры; решены на ЭВМ системы уравнений криволинейного движения частицы применительно к условиям очистки выбросов при сушке пищевых продуктов.

3. Теоретические и экспериментальные исследования разработанного центробежно-инерционного способа сухой очистки выбросов позволяют сделать выводы о том, что сепарационный узел в виде лопаточного ротора с центробежным стаканом-пылеотделителем существенно повышает эффективность очистки за счет процессов сепарации частиц, протекающих в роторе, причем эффективность очистки может достигать 99 %; предельный размер частиц, улавливаемых в ротационном сепараторе при указанной выше эффективности, составляет  $1,5 + 2$  мкм; степень очистки аппарата слабо зависит от величины расхода очищаемого воздуха и во всем диапазоне варьируемых во время испытаний расходов, превышает эффективность очистки в циклонах; гидравлическое сопротивление аппарата зависит от расхода очищаемого воздуха и частоты вращения ротора; конструктивное исполнение разработанного сепарационного узла позволяет обеспечить высокую эффективность очистки в достаточно широком диапазоне меняющихся во времени расходов воздуха, что существенно расширяет возможности его применения (включая те случаи, когда обычные циклоны применять нецелесообразно).

4. Для процессов мокрой очистки выбросов при организации перемешивающегося взвешенного газожидкостного слоя за счет подвода газа через вращающиеся патрубки получено уравнение регрессии, описывающее влияние ряда факторов на гидравлическое сопротивление аппарата, которое определяется угловой скоростью патрубков и глубиной их погружения в жидкость; рассчитан и построен профиль скоростей воздушного потока в сечении аппарата, позволяющий судить о количественной характеристике степени неравномерности распределения газа; получены уравнения регрессии, показывающие влияние конструктивных параметров аппарата и режимных параметров очищаемого воздуха на эффективность очистки; исследована фракционная эффективность улавливания пылевидного продукта; получены критериальные уравнения для инженерного расчета аппарата различной производительности по воздуху; определены численные значения разработанных безразмерных показателей, соответствующие оптимальному взвешенному слою и энергозатратам на процесс.

5. Применительно к процессу мокрой очистки за счет самоорошения при тангенциальном вводе газа, раскручивающем лопастное устрой-

ство, установлено, что гидравлическое сопротивление возрастает с увеличением частоты вращения лопастей и глубины их первоначального погружения в жидкость; установлены численные показатели, свидетельствующие об увеличении чисел  $Eu$  при увеличении относительной глубины погружения лопастей при различных значениях  $Re$ , получено соответствующее математическое описание процесса; установлены общие закономерности и общий характер изменения брызгоуноса в разработанных аппаратах, получены соответствующие расчетные уравнения в безразмерном виде; установлено, что для мелкодисперсных фракций пыли увеличение эффективности очистки связано с увеличением поверхности контакта фаз за счет уплотнения структуры газожидкостного слоя при увеличении скорости вращения лопастей, получены соответствующие зависимости эффективности очистки от безразмерных показателей глубины погружения лопастей и комплекса, определяющего режим работы аппарата.

6. Сформирован (на уровне изобретения) и экспериментально подтвержден способ конденсационного улавливания аэрозолей, позволяющий значительно интенсифицировать конденсационное укрупнение и улавливание частиц; предложено использовать эффект конденсации для увеличения степени очистки отработанного сушильного воздуха от пылевидного продукта (используя его температуру) за счет поддержания температуры воды в системе мокрой очистки не выше  $20^{\circ}\text{C}$ .

7. Впервые для аппаратов с внутренней циркуляцией очищающей жидкости экспериментально установлены закономерности процессов насыщения воды пылевидным продуктом (при разных расходах подпиточной жидкости); на основе математического описания процессов, происходящих в очищающей жидкости при поглощении ею пылевидного продукта, получена формула расчета концентрации сухих веществ в воде аппарата, с использованием которой по соответствующим уравнениям можно определить изменения кинематической вязкости и поверхностного натяжения жидкости.

8. Впервые определена пенообразующая способность белок содержащих пылей (СОМ, ЗЛМ, низколактозная смесь, "Белакт", "Оволакт", "Ин.литан") в процессе их мокрого центробежного улавливания из отработанного сушильного воздуха; выявлена зависимость объема пены от концентрации сухих веществ в растворе и его температуры; на основе полиномиальной зависимости кратности пены от концентрации сухих веществ в растворе и его температуры рассчитаны на ЭВМ СМ 1420 для каждого продукта соответствующие коэффициенты, позволяющие реализовать математическое описание экспериментальных данных при решении вопросов совершенствования очистки выбросов.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Варваров В.В., Дворецкий Г.Б., Полянский К.К. Очистка теплоносителя при сушке пищевых продуктов (монография) - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1988. - 138 с.
2. Варваров В.В., Полянский К.К., Дворецкий Г.Б. Совершенствование способов очистки отработанного воздуха при сушке молочных продуктов: Обзорная информация, М.: АгроНИИТЭИММП, 1989. - 48 с.
3. Варваров В.В. Основы охраны окружающей среды на пищевых предприятиях. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1989. - 82 с.
4. Варваров В.В. Проблема улавливания пылезидных фракций в технологии сыпучих пищевых продуктов: Научный обзор. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1988, №4, с. 27-36.
5. Варваров В.В. К вопросу совершенствования мокрого пылеулавливания. /Р.ж. ЦНИС, серия "Проектирование и стр-во", 1979, вып. 3, с. 42-43.
6. Варваров В.В., Крикунов Г.Н. Методика исследований основных физико-химических свойств дрожжевой пыли и расчет требующейся фракционной эффективности ее улавливания. Деп. в ЦНИИТЭИпищепром, 1980, №283.
7. Варваров В.В., Крикунов Г.Н. Исследование гидравлического сопротивления бризгоноса ротационного пылеуловителя, работающего с использованием эффекта кавитации жидкости. Деп. в ОНИИТЭИМ, 1980, № 264 х II - 180.
8. Крикунов Г.Н., Варваров В.В. Пылеуловитель. - Воронеж. ЦНТИ, информ. листок № 19-80, 1980. - 4 с.
9. Крикунов Г.Н., Варваров В.В. Снижение взрывоопасности в дрожжевом производстве. - Хлебопекарная и кондитерская пром-сть, 1980, №6, с. 39-41.
10. Крикунов Г.Н., Варваров В.В., Дерканосов Н.И. Эффективность очистки отработанного воздуха. - Хлебопекарная и кондитерская пром-сть, 1980, №8, с. 38-41.
11. Дерканосов Н.И., Варваров В.В. Установка для улавливания пыли при высушивании хлебопекарных дрожжей. - Пищевая пром-сть. Н.-т. сб. ЦНИИТЭИпищепром, серия I4, 1981, вып. 4, с. 5-7.
12. Варваров В.В. Исследование влияния параметров запыленного воздуха на эффективность мокрого ротационного пылеуловителя. Деп. в ВНИИС, 1981, № 2871.
13. Дерканосов Н.И., Варваров В.В. О качестве хлебопекарных дрожжей, улавливаемых из отработанного воздуха сушилок. - Пищевая пром-сть. Н.-т. р. сб. ЦНИИТЭИпищепром, серия I4, 1982, вып. 3, с. 23-25.
14. Варваров В.В. К вопросу улавливания пылевидных продуктов при сушке дрожжей. Деп. в ЦНИИТЭИпищепром, 1982, № 570.
15. Дерканосов Н.И., Варваров В.В. Мокрая очистка воздуха при сушке хлебопекарных дрожжей. - Хлебопекарная и кондитерская пром-сть, 1983, № I, с. 41-43.
16. Варваров В.В. Оценка эффективности циклонов для очистки выбросов при сушке хлебопекарных дрожжей. Деп. в ЦНИИТЭИпищепром, 1983, № 724.
17. Варваров В.В., Полянский К.К. Физико-химические свойства мелкой фракций хлебопекарных дрожжей при сушке. - Хлебопекарная и кондитерская пром-сть, 1984, № 8, с. 40-41.
18. Варваров В.В., Полянский В.К. Влияние параметров отработанного теплоносителя на процесс его очистки при сушке дрожжей. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1984, № 5, с. 82-84.
19. Варваров В.В., Полянский В.К. О некоторых физико-химических свойствах пыли хлебопекарных дрожжей, содержащихся в выбросах промышленных сушилок. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1985, №2, с. II4-II5.
20. Варваров В.В., Никонов И.Г., Полянский К.К. Дисперсный состав частиц молочного сахара в выбросах при его сушке. - Молочная пром-сть, 1985, № I, с. 41-42.
21. Варваров В.В., Полянский К.К., Никонов И.Г. Установка для очистки отработанного теплоносителя при сушке молочного сахара. - Молочная пром-сть, р.ж. ЦНИИТЭИ мясомолпром, 1985, вып. 5, с. 9-12.

22. Варваров В.В., Никонов И.Г., Полянский К.К. Динамика контактирования фаз в газопромывателе при очистке выбросов. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1985, № 5, с. 63-66.
23. Варваров В.В., Полянский К.К. К расчету эффективности очистки отработанного воздуха при сушке молочных продуктов. - Молочная пром-сть, 1985, № 11, с. 36.
24. Варваров В.В., Кемынина И.В. Очистка выбросов при сушке хлебопекарных и кормовых дрожжей. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1986, № 1, с. 112.
25. Варваров В.В., Никонов И.Г., Полянский К.К. Профили скорости газа в газопромывателе с вращающимся узлом контактирования фаз. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1986, № 4, с. 89-92.
26. Варваров В.В., Полянский К.К. Расчет эффективности циклонов для очистки выбросов при сушке молочных продуктов. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1986, № 2, с. 126.
27. Варваров В.В., Голыбин В.А. Дисперсный состав пыли, образующейся при сушке сахара-песка. - Сахарная пром-сть, 1986, № 9, с. 17-18.
28. Варваров В.В., Полянский К.К. О пылевидных продуктах, содержащихся в выбросах сушилок. - Пищевая и перерабатывающая пром-сть, 1987, № 2, с. 54.
29. Варваров В.В., Полянский К.К. Текучесть и угол естественного откоса сухого молочного сахара. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1987, № 1, с. 118-120.
30. Варваров В.В., Полянский К.К. Установка для очистки отработанного воздуха. - Молочная пром-сть, 1987, № 4, с. 11-12.
31. Варваров В.В., Полянский К.К. Влияние гранулометрического состава сухого молочного сахара на его объемную массу. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1987, № 2, с. 115-117.
32. Варваров В.В., Подоскин А.С. Очистка отработанного воздуха при сушке сахара-песка (обзор). Деп. в АгроНИИТЭИ пищепром, 1987, № 1577.
33. Варваров В.В., Полянский К.К. Эффективность совершенствования средств очистки выбросов распылительных сушилок. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1988, № 2, с. 138.
34. Варваров В.В., Полянский К.К. Исследование процесса поглощения пылевидных молочных продуктов жидкостью. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1989, № 5, с. 86-88.
35. Инструкция по эксплуатации систем очистки отработанного воздуха при распылительной сушке молочных продуктов/Полянский К.К., Варваров В.В., Дворецкий Г.Б. - ВПО "Союзконсервмолоко", 1989, - с. 18.
36. Инструкция по определению плановых показателей по охране атмосферного воздуха и расчету предельно допустимых выбросов в молочно-консервной промышленности/Полянский К.К., Варваров В.В., Дворецкий Г.Б. - ВПО "Союзконсервмолоко", 1989, - 34 с.
37. А.с. 789134 (СССР). Устройство для мокрой очистки газа/Варваров В.В. - Оpubл. в Б.И., 1980, № 47.
38. А.с. 782838 (СССР). Самоочищающийся патронный фильтр/Горячев К.В., Варваров В.В. - Оpubл. в Б.И., 1980, № 44.
39. А.с. 814408 (СССР). Способ улавливания высокодисперсных аэрозоль/Крикунов Г.Н., Варваров В.В. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 11.
40. А.с. 827129 (СССР). Пылеуловитель/Крикунов Г.Н., Варваров В.В. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 17.
41. А.с. 850171 (СССР). Аппарат для мокрой очистки газа/Варваров В.В. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 28.
42. А.с. 858886 (СССР). Установка для мокрой очистки от дрожжей отработанного сушильного газа/Дерканосов Н.И., Варваров В.В. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 32.
43. А.с. 1029993 (СССР). Устройство для мокрой очистки газа/Варваров В.В. - Оpubл. в Б.И., 1983, № 27.
44. А.с. 1085617 (СССР). Устройство для мокрой очистки воздуха от пыли/Варваров В.В., Полянский К.К. - Оpubл. в Б.И., 1984, № 14.

45. А.с. 112027 (СССР). Устройство для мокрой очистки газа/Варваров В.В. - Оpubл. в Б.И., 1984, № 40.  
 46. А.с. 1212513 (СССР). Устройство для мокрой очистки газа/Варваров В.В., Полянски К.К., Никонов И.Г. - Оpubл. в Б.И., 1986, № 7.  
 47. А.с. 1318264 (СССР). Устройство для мокрой очистки газа/Варваров В.В. - Оpubл. в Б.И., 1987, № 23.  
 48. А.с. 1583145 (СССР). Вихревое пылеуловитель/Варваров В.В., Б.И., 1990, № 23.  
 49. А.с. 1599056 (СССР). Пылеотделитель/Варваров В.В., Б.И., 1990, № 38.

## Условные обозначения

- $M_0, M_{01}$  - объемная масса (без уплотнения, с уплотнением),  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $W$  - влажность пыли, %;  
 $d, d_{50}, d_{50}, d_{\eta=50}$  - соответственно диаметр частицы, размер частицы, эквивалентный диаметр частицы, среднегеометрический диаметр частиц, улавливаемых на 50% в циклонах ЦН, мкм;  
 $d_{\text{укф}}$  - диаметр окружности, описываемой УКФ;  
 $\sigma$  - стандартное отклонение величины  $\sigma$ ;  
 $\eta$  - эффективность очистки, %;  
 $\rho_r, \rho_r$  - плотность газа, плотность частицы,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $\nu_r$  - скорость газа (вектор);  
 $\nu_r$  - коэффициент кинематической вязкости газа,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $H_0, H_2, H_3$  - соответственно первоначальная высота слоя жидкости, высота взвешенного газожидкостного слоя, эквивалентная высота (в диапазоне  $0 < H_2 \leq 0,5$  берется как  $H_0$ , при  $0,5 < H_2 < 2,5$  берется  $H_2$ ), м;  
 $D, D_{\text{ан.э}}$  - диаметр миделева сечения патрубка УКФ, м; эквивалентный диаметр (1,13 м);  
 $R_l$  - радиус окружности, описываемой лопастями УКФ, м;  
 $U$  - относительный брызгоунос, %;  
 $\Delta P, \Delta P_n$  - гидравлическое сопротивление аппарата и газожидкостного слоя соответственно, Па;  
 $v_r, v_r, v_0'$  - средние скорости газа на входе в аппарат, по сечению аппарата, окружная скорость на выходе из отверстий патрубков УКФ соответственно, м/с;  
 $\omega$  - угловая скорость УКФ, рад/с;  
 $C_0$  - начальная концентрация сухих веществ в воде;  
 $V$  - объем, заполненный водой в момент пуска аппарата;  
 $K$  - количество пыли, поступающей равномерно (принято условно) в очищающую жидкость;  
 $M$  - количество воды, отводимой из пылеуловителя (столько же воды поступает в аппарат для поддержания необходимого уровня);  
 $E_u = \frac{\Delta P}{\rho_r v_r^2}$  - критерий Эйлера;  $Re_n, Re_l \left( \frac{\omega d_{\text{укф}}}{2\nu_r} \right)$  - критерий Рейнольдса соответственно для патрубков УКФ и лопастей УКФ;  
 $Fr_m = \frac{\omega^2 D_{\text{ан.э}}}{g}$  - центробежный критерий Фруда;  
 $R_v = Re_r Fr = \frac{v_r^3}{\nu_r g}$  - критерий инерционно-вязкостный по газовой фазе.