

ST  
Г 18

На правах рукописи



**Гамрекели Михаил Николаевич**

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЭНЕРГО-РЕСУРСΟΣБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ  
СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
УСТАНОВОК РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ**

**05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Екатеринбург – 2007**



Работа выполнена в Свердловском научно-исследовательском институте химического машиностроения (СвердНИИХИММАШ) и Уральском государственном лесотехническом университете (УГЛТУ)

Научный консультант: заслуженный деятель науки и техники РФ  
доктор технических наук, профессор  
Рудобашта Станислав Павлович

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники РФ  
доктор технических наук, профессор  
Леончик Борис Иосифович

доктор технических наук, профессор  
Швыдкий Владимир Серафимович

доктор технических наук, профессор  
Сергеев Валерий Васильевич

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара, г. Москва

Защита состоится 12 ноября 2007 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.09 в ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. I

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «УГТУ – УПИ».

Автореферат разослан 9 октября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор химических наук, профессор

Б.Д. Васин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Процессы тепломассообмена при распыливании жидкости и образовании газодисперсных струй и потоков находят широкое применение в машинах и аппаратах различного назначения, в том числе в двигателях внутреннего сгорания, реактивных и ракетных аппаратах, системах водоиспарительного кондиционирования, энергетике, а также при распылительной сушке самых различных продуктов.

Класс процессов и аппаратов распылительной сушки представлен двумя группами.

Для первой наиболее распространенной группы конвективных распылительных башенных сушилок характерны большие расходы тепла и теплоносителя и габариты распылительных камер и газоочистного оборудования. Поэтому технологические, конструкторские решения и эксплуатационные меры, способствующие даже незначительному снижению удельных энергозатрат, удельного расхода сушильного газа и концентрации продукта в газовых выбросах позволяют сберечь большое количество энергии, ценных продуктов и получить ощутимый экологический эффект.

Ко второй группе относятся трубчатые аппараты с теплоподводом от высокотемпературных стенок, которые могут нагреваться при прохождении через стенку электрического тока или от внешних источников различных типов. Для этих аппаратов характерно совмещение распылительной сушки раствора и последующей термообработки сухих частиц продукта. Отсутствие необходимости в применении специального газа-теплоносителя приводит к снижению до минимума затрат тепла и выбросов продукта в атмосферу.

Недостаточность теоретических разработок и экспериментальных исследований аэродинамики газодисперсной струи, ограниченной стенками камеры, и интенсивности тепломассообмена в газодисперсных средах в условиях сложного теплопереноса конвекцией и излучением до последнего времени не позволяли осуществлять масштабный переход к аппаратам высокотемпературной распылительной сушки большей производительности.

Сдерживающими факторами в реализации возможностей интенсификации тепломассообмена при конвективной распылительной сушке является недостаток знаний об интенсивности теплопереноса к каплям в факельной зоне, а также теоретически и экспериментально обоснованных представлений об источниках и характере циркуляции в сушильных камерах. Как следствие, отсутствует возможность влиять на интенсивность межзонального теплопереноса в камере, определять обусловленное аэродинамикой время пребывания и управлять им. По этим причинам существующие методики расчета недостаточно точны, а расширение области их применения приводит к неприемлемым результатам.

Отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору предельных значений параметров процессов одно- и двухстадийной распылительной сушки.

Аппаратурно-технологические решения, принимаемые при разработке установок распылительной сушки, по составу, типам и параметрам входящих в них аппаратов и систем, нельзя считать наиболее рациональными, поскольку их выбор происходит из ограниченного числа вариантов.

Направления исследований по интенсификации тепломассообмена и разработке ресурсосберегающих решений при распылительной сушке, как широко распро-



страненного и ресурсозатратного процесса, востребовано промышленностью. Актуальность темы обусловлена также и тем, что в настоящее время в соответствующих разделах науки и технике накоплен достаточный объем знаний о распылительной сушке для критического анализа и уточнения условий их применимости. Это позволяет сформулировать направления исследований путей достижения максимальной эффективности ресурсосбережения при эксплуатации сушильных установок.

#### Цель диссертационной работы

Целью работы является повышение эффективности работы установок распылительной сушки.

#### Направления исследований

В соответствии с поставленной целью на основе анализа по литературным источникам состояния теоретических и экспериментальных исследований в области интенсификации теплообмена и энерго-ресурсосбережения при распылительной сушке были определены следующие направления научно-исследовательских работ при работе над диссертацией:

- исследования резервов интенсификации теплообмена и энерго-ресурсосбережения;
- разработка комплекса энерго-ресурсосберегающих технических решений, методического обеспечения их применения и экспериментальная и промышленная проверка их эффективности;
- разработка системы выбора рациональной аппаратно-технологической структуры установок распылительной сушки, соответствующей условиям энерго-ресурсосбережения, из множества возможных вариантов.

#### Задачи диссертации

Для достижения цели диссертации были поставлены и решены задачи:

- 1) Теоретическое и экспериментальное исследование аэродинамики и условий управления временем пребывания в распылительных камерах при подачи струй теплоносителя и распыливаемого газа.
- 2) Анализ факторов интенсификации теплообмена в башенных конвективных и трубчатых высокотемпературных распылительных камерах.
- 3) Определение параметрических условий энергосбережения при организации одно- и двухстадийного процессов распылительной сушки.
- 4) Разработка экспериментально и аналитически обоснованной физической модели процесса распылительной сушки с применением теории турбулентных струй.
- 5) Разработка методик расчета сушильных камер и вспомогательных устройств, оказывающих влияние на интенсивность теплообмена, время пребывания и энерго-ресурсосбережение.
- 6) Структурно-функциональное исследование и разработка обобщающих аппаратно-функциональной схемы, структурных схем оборудования класса установок распылительной сушки и системы выбора рациональных технических решений (СРТР).
- 7) Разработка комплекса технологических, аппаратных и эксплуатационных технических решений для эффективного пылеулавливания и снижения потерь тепла.
- 8) Выполнение опытно-конструкторских и внедренческих работ по реализации результатов теоретических и экспериментальных исследований с применением разработанных технических решений, соответствующих условиям энерго-ресурсосбережения и экологической безопасности.

#### Методы исследований

Методологической основой диссертации являются положения ряда фундаментальных наук: теории турбулентных струй, теории теплообмена, теории подобия. При математическом моделировании процессов переноса тепла и массы в межфазных процессах газодисперсных потоков, аэродинамики струйных течений, исследовании времени пребывания использовался математический аппарат теории дифференциального и интегрального исчисления. При анализе экспериментальных данных применялись методы математической статистики. Наряду со стандартными методиками измерений разработаны и применялись оригинальные методики измерения скоростей групп осевых капель в развивающейся струе (факеле), определения границ испарения факела распыленной жидкости, температур стенки аппарата и индуктивный метод поддержания постоянства подводимой мощности тепловыделений в стенке камеры с прямым электрическим нагревом. Температурные поля в газодисперсных потоках при тепловом излучении от стенок измерялись специально разработанной экранированной термопарой.

#### Достоверность и обоснованность

Достоверность теоретических исследований подтверждается корректным использованием при моделировании процессов аэродинамики и теплообмена в распылительных камерах положений ряда фундаментальных наук: теории турбулентных струй, теории теплообмена, теории подобия, сходимостью результатов расчетов, полученных с применением альтернативных математических моделей, являющихся известными аналогами исследованных процессов. Научные выводы обоснованы результатами экспериментальных исследований автора и других ученых, использованием методов математической статистики, допущениями, принятыми на основе классических закономерностей.

Достоверность экспериментальных данных подтверждена применением стандартных методик и приборов, а вновь разработанных средств измерений специально разработанными методиками оценки погрешности. Точность экспериментальных зависимостей определялась методом наименьших квадратов.

Исследования по теме диссертации, проводились автором с 1964 г. в Свердловском научно-исследовательском институте химического машиностроения и с 1987 г. в Уральском государственном лесотехническом университете.

#### Научная новизна характеризуется впервые полученными результатами:

1. Получены зависимости для расчета расхода потоков газа и оценки роли действия различных факторов, вызывающих циркуляцию и оказывающих влияние на ее интенсивность в струйных и распылительных камерах. Расход потока, вызванного вентиляционным эффектом распыливаемого диска диаметром 200 мм с частотой вращения 15000 1/мин с учетом эжекции газа в его каналы, составляет ~ 1% (в долях от расхода сушильного воздуха). За счет тепловой тяги расход рециркулирующего потока в распылительной камере с высокотемпературными стенками восполняется на 5-23%.

Разработана физическая модель возникновения встречного по отношению к тормозящимся каплям потока газа, на основе которой получена аналитическая зависимость для расчета суммарного расхода эжектируемого газового потока при распыливании жидкости. Установлено, что расход этого потока составил 87% от расхода подаваемого в камеру теплоносителя. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными других авторов.



2. Получена аналитическая зависимость между полями температур и скоростей в турбулентной газовой струе. По результатам расчетов с применением этой зависимости и экспериментальных данных установлено, что законы теории свободных турбулентных струй могут быть применены для стесненных осесимметричных газовых струй на значительно большем расстоянии от их начала, вплоть до сечения их встречи с ограждающими стенками распылительных и газоструйных глухих камер, и при значительно более высоких, до критических значений, скоростях истечения. Таким образом, аппараты распылительной сушки наиболее распространенных конструкций по аэродинамическим характеристикам можно отнести к глухим струйным камерам.

3. На основе положений теории турбулентных струй получены аналитические зависимости, устанавливающие связь между текущими значениями скорости, расхода осесимметричного газодисперсного факела и кольцевой струи теплоносителя и параметрами истечения. Получены количественные соотношения для расчета кратности циркуляции в аппаратах распылительной сушки и камерах другого технологического назначения.

Установлено, что расход возникающего потока газа (факела) на выходе из факельной зоны камеры во много раз превышает расход первичной струи, которая является основным источником циркуляции в камере. Объемная кратность циркуляции как отношение расхода факела к начальному расходу струи в трубчатых высокотемпературных распылительных камерах при околокритических скоростях истечения через круглое сопло форсунки составляет  $k_{fv}=65-177$ , в распылительных камерах с кольцевым устройством для подачи теплоносителя при начальной скорости 28-105 м/с составляет  $k_{fv}=6,3-12,7$ .

4. Получены аналитические зависимости времени пребывания газовых ячеек и частиц на участке от начала круглой и кольцевой осесимметричной струй до текущих сечений в распылительных камерах, а также формула для расчета вероятностного времени пребывания в факельной зоне.

Зависимости позволяют управлять временем пребывания и увеличивать его до заданных значений, изменяя геометрические размеры воздухораспределительного аппарата или диаметр отверстия форсунки для подачи струи и начальную скорость истечения кольцевой струи теплоносителя или круглой струи распыливаемого газа. Таким способом при обеспечении необходимого времени пребывания можно также существенно увеличить производительность за счет повышения расхода теплоносителя в аппаратах конвективной распылительной сушки или за счет интенсификации циркуляции в камерах с теплоподводом от высокотемпературных стенок.

5. Получены экспериментальные зависимости, подтвержденные положениями теории турбулентных струй, характеризующие аэродинамику зоны газодисперсного факела, которые устанавливают соотношения между значениями линий равных скоростей газовой струи и линий равных плотностей орошения поперечного сечения камеры распыленной жидкостью.

Получены зависимости изменения по длине струи значений радиальной скорости газа, наполняющего развивающуюся струю, и коэффициента структуры, характеризующего уровень турбулентности в струе, которые объясняют характер межфазного взаимодействия в струе.

Получены зависимости для расчета значений толщины и скорости восходяще-

го вдоль стенки потока в сечении встречи конуса струи с ограждающими стенками камеры. Для круглой осесимметричной струи при околокритических скоростях истечения струи толщина потока составляет 53-88 мм, а скорость 9-29,6 м/с. Высокие значения скорости потока объясняют установленное экспериментально резкое локальное снижение температуры стенки, что обусловлено повышенной интенсивностью теплопереноса в сечении встречи.

6. Теоретически обоснована возможность создания безциркуляционной факельной зоны в распылительных камерах за счет замены одной струи системой кольцевых струй с таким же расходом, распределенным в начальном сечении истечения по закону развития турбулентной струи. Получены зависимости для расчета ее геометрических параметров. Предложенная самодостаточная система струй позволяет устранить или существенно уменьшить циркуляцию в камере. Причем, это можно осуществлять без вдува значительного количества дополнительного спутного струе потока газа, как это делается при подаче газа в виде одной струи. С применением самодостаточной системы струй время пребывания увеличивается в 2-3 раза, объем камеры уменьшается в 2,6-2,86 раза, поверхность камеры сокращается в 1,8-1,9 раза. Это приводит к пропорциональному снижению внешних потерь тепла в окружающую среду.

7. Результаты аналитических исследований с использованием экспериментальной кривой сушки распыленной жидкости показали, что время пребывания в зоне активного испарения, в которой происходят первый и переходный периоды распылительной сушки и испаряется до 90 % всей влаги, составляет 2-2,5 % от времени пребывания в камере. Установлено, что интенсивность теплообмена вблизи распыливаемого диска, обусловленная гидродинамическим взаимодействием тормозящихся капель и струей теплоносителя, не реализуется в полной мере. Это позволило предложить значительно поднять производительность сушильных камер по испаренной влаге за счет существенного увеличения количества тепла, подаваемого в эту зону.

В то же время показано, что традиционно предлагаемые разными исследователями меры по повышению движущей силы массообмена путем уменьшения циркуляции, не могут быть эффективны в распылительных сушильных камерах за пределами зоны активного испарения. Расчеты подтверждают, что уже на границах зоны устанавливается влагосодержание воздуха-теплоносителя, близкое к конечному, в результате чего движущая сила массопереноса значительно снижена.

8. Предложена экспериментально-аналитическая методика расчета необходимых размеров камеры и параметров процесса, при которых достаточно точно и просто учитывается кинетика сушки конкретного вида продукта. Методика сочетает аналитическое определение необходимого времени пребывания по зависимостям, полученным автором с применением теории турбулентных струй, и экспериментальное определение закономерности снижения средней влажности продукта и температуры воздуха на участке зоны сушки, который соответствует периоду падающей скорости сушки.

9. Предложены формулы и алгоритм расчета предельно высоких значений начальной температуры и расхода сушильного воздуха в зависимости от кинетических характеристик сушки продукта.

Для распылительной сушки установлены зависимости предельных значений показателей энерго-ресурсосбережения (удельного расхода тепла, электроэнергии, термического к.п.д., удельного расхода сушильного газа) от параметров одно- и



двухстадийного процессов распылительной сушки. За счет рационального выбора параметров первой и второй стадий распылительной сушки можно получить наилучшие значения показателей энерго-ресурсосбережения при работе установок – удельные значения (на 1 кг испаренной влаги): расход сушильного воздуха – 22 кг/кг, затраты тепла – 3700 кДж/кг, термический к.п.д. – 91%.

10. На основе уравнения конвективного теплопереноса в цилиндрическом канале и экспериментальных данных получены для аппаратов высокотемпературной распылительной сушки и прокалики зависимости чисел подобия, которые позволяют рассчитывать протяженность зоны испарения факела распыленной жидкости и зоны перегрева, и определять температуру на границах этих зон. В зависимостях впервые учтены турбулентный перенос в результате истечения струи числом  $F_r$  для струи, лучистый перенос числом поглотительной способности облака капель и частиц продукта и процесс испарения жидкости в факельной зоне с применением в качестве определяющего параметра приведенной температуры среды.

11. Для форсуночной камеры с высокотемпературными стенками определены коэффициенты теплоотдачи от стенок к среде с учетом теплового потока, переносимого в результате циркуляции среды в распылительной цилиндрической высокотемпературной камере. Получены данные о высокой интенсивности теплоотдачи от стенок. В факельной зоне с интенсивной рециркуляцией средний коэффициент теплоотдачи от стенок к среде составляет  $\alpha_k = 112 \text{ Вт/м}^2\text{град}$ , что существенно выше, чем в зоне перегрева, где  $\alpha_k = 79 \text{ Вт/м}^2\text{град}$ .

Получены аналитические зависимости для расчета коэффициентов лучепоглощения капель. Расчетами с применением экспериментальных данных установлено, что доля лучистого переноса тепла от стенок камеры к осевым наиболее дальнобойным каплям, проброс которых определяет протяженность зоны испарения, пренебрежимо мала и зависит от интенсивности конвективного теплопереноса к ним.

12. Разработана система синтеза рациональных технических решений класса комплексных технологических установок. Класс установок распылительной сушки и прокалики представлен в виде обобщающих графиков: структурной схемы функциональных признаков и пяти деревьев основного и вспомогательного аппаратов и систем, и эквивалентных им обобщающих структурных формул.

Предложены теорема и следствие к ней для расчета мощности множества возможных технических решений комплексной установки как вариантов сочетаний применяемых аппаратурно-функциональных и технологических признаков.

Разработаны схема многофакторной рациональной организации распылительной сушки и блок-схема алгоритма выбора совокупности технических решений в составе комплексной установки, отвечающей условию минимизации энерго-ресурсозатрат.

#### Практическая значимость

1. Разработаны методики расчета:

- пневматической форсунки внутреннего смешения с двухступенчатым процессом диспергирования;
- времени пребывания в камерах с осесимметричными круглой и кольцевой струями;
- экспериментально-аналитической методики расчета конвективной распылительной сушки с учетом кинетики сушки продукта;
- предельных значений расходов и начальной температуры сушильного воздуха;

– размеров распылительной сушильной камеры с заданной кратностью рециркуляции;

– двухстадийной установки с распылительной сушкой на первой стадии и с применением на второй стадии в качестве сушильного агента глубоко осушенного воздуха;

- самодостаточной системы кольцевых газовых струй;
- высокотемпературной безциркуляционной камеры распылительной сушки;
- распылительного сушильно-прокалочного аппарата с применением зависимостей на основе теории подобия;
- установки распылительной сушки и прокалики с использованием теплоты сжигания газа.

2. Разработаны проектные и эксплуатационные решения:

– рабочие проекты серий промышленных установок распылительной сушки для производства сухих молочных продуктов: сухого цельного и обезжиренного молока, заменителей цельного молока и казеината натрия;

– одностадийные технологические процессы и установки высокотемпературной распылительной сушки и прокалики жидких отходов, производства оксидов редких и редкоземельных металлов, грануляции аэрозольных порошков оксидов ферритов и тяжелых металлов;

- конструкции сушильно-прокалочных аппаратов с теплоподводом от стенок;
- технические предложения по реконструкции установок конвективной распылительной сушки с удвоением производительности;

– технические предложения по созданию сушильно-прокалочной установки «ЭРА» с использованием теплоты сжигания газа;

– метод эксплуатационной диагностики потерь пара и оценки снижения производительности сушилок при работе калориферов;

– алгоритм поиска рациональных технических решений в классе установок распылительной сушки и прокалики.

3. Внедрены:

- установка для получения оксидов редкоземельных металлов;
- промышленные установки для получения сухих молочных продуктов.

4. Использованы в проектах оборудования и на действующих установках технические решения по авторским свидетельствам СССР №№ 2651359/23-23 (Узел отвода газов и сушильной камеры), 2612818/28-13 (Устройство для мокрой очистки воздуха) и 3007408/28-13 (разгрузочное устройство для сыпучих материалов).

5. Внедрения позволили получить значительный экономический эффект.

Суммы полученного эффекта в ценах 1980г составила 17,3 млн. дол. США и 1,3 млн. руб. от внедрения установок для сушки молочных продуктов, а также более 22 млн. руб. ожидаемого эффекта от перевода внедренных установок сушки молочных продуктов на режимы работы с удвоением производительности.

#### Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических встречах ученых и специалистов: Международная конференция стран-членов СЭВ по проблеме «Исследование в области обработки и захоронения радиоактивных отходов (г. Дрезден, 1967г.); 2-ая и 5-ая научно-техническая конференция Уральского политехнического института (г. Свердловск, 1968г., 1976



г.); VIII Всесоюзная межвузовская конференция по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем (г. Одесса, 1968г.); Всесоюзное совещание по тепломассопереносу (г. Киев, 1968г.); IV Международный конгресс по химической технике, химическому машиностроению и автоматизации – ХИСА (г. Прага, 1972г.); Всесоюзная научно-техническая конференция «Дальнейшее совершенствование теории, техники и технологии сушки» (г. Чернигов, 1981г.); Научно-технический семинар «Виброакустические процессы в технологиях, оборудовании и сооружениях лесного комплекса» (г. Екатеринбург, 1999г.); VII Международный экологический симпозиум «Урал атомный. Урал промышленный» (г. Екатеринбург, 1999г.); Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы промышленной экологии» (г. Орел, 1999 г.); Международная научно-техническая конференция «Уралэкология-техноген-2000» (г. Екатеринбург, 2000г.); 10-ая Всероссийская научно-техническая конференция «Теплофизика технологических процессов» (г. Рыбинск, 2000г.); 4-ый Всероссийский научный симпозиум «Безопасность биосферы-2000» (г. Екатеринбург, 2000г.); Международная научно-техническая конференция «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (г. Екатеринбург, 2001г.); Международная научно-техническая конференция «Уралэкология. Техноген. Металлургия-2001» (г. Екатеринбург, 2001г.); IV, V, VI Всероссийские научно-технические конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды» (г. Рыбинск, 1999г., 2001г., 2004г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Химико-лесной комплекс – проблемы и решения» (г. Красноярск, 2001г.); 1-ая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)», СЭТТ-2002 (г. Москва, 2002г.); 2-ая Международная конференция по сушке Северных стран (г. Копенгаген, 2003г.); 5-ый Минский Международный форум по тепломассообмену (г. Минск, 2004г.); 5-ая теплофизическая школа «Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством» (г. Тамбов, 2004г.); 2-ая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и тепловые процессы) СЭТТ – 2005. – М.

Диссертация была рассмотрена и одобрена на заседании Президиума Всероссийского Комитета РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов (Протокол от 15 марта 2006 г, г. Москва).

#### Публикации

По материалам диссертации опубликовано 75 печатных работ, в том числе одна монография, три авторских свидетельства СССР.

Основные теоретические положения, выводы и рекомендации выполнены автором лично. В проведении исследований и разработок, направления которых определялась автором, принимали участие В.И. Давыдов, В.Д. Харитонов, В.А. Целищев и другие, что нашло отражение в публикациях.

#### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, приложений, списка использованных источников из 359 наименований, изложена на 416 стр. машинописного текста, содержит 101 рисунок, 15 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены ее цель и задачи, положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность работы.

### 1. Проблемные вопросы интенсификации тепломассообмена и ресурсосбережения при распылительной сушке

Литературный обзор посвящен анализу результатов исследований испарения капель жидкости при распылительной сушке в условиях теплопередачи конвекцией и излучением и изучению сведений об аэродинамике испаряющихся капель и газодисперсного факела.

Большой вклад в развитие этой отрасли науки сделали отечественные и зарубежные ученые Б.И. Срезневский, Н.А. Фукс, Маршалл, А.В. Лыков, Д.А. Франк-Каменецкий, Ранц, Фрослинг, А.А. Гухман, Льюис, Йорк, Стуббс, Ингебо, Маннинг, Соо, Кеслер, Сполдинг, Нукияма, Танасава, Торобин, М.Ю. Лурье, А.С. Лышевский, П.Д. Лебедев, А.А. Долинский, М.В. Лыков, С.М. Ильяшенко, Б.В. Раушенбах, Г.Н. Абрамович, А.М. Ластовцев, П.Г. Романков, О.А. Кремнев, А.П. Фокин, Б.И. Леончик, В.И. Муштаев и другие. Работы Ми, Хоттеля, Кохена, Эгберта, А.Г. Блоха, Нуссельта, Симпсона, К.С. Шифрина, Ван де Хюлста создали предпосылки для развития процессов сушки диспергированных материалов с подводом тепла излучением.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований высокотемпературной распылительной сушки в камерах с теплоподводом от стенок, выполненные зарубежными учеными Гофманом, Гаувином, Аллеманом и Джонсоном, из-за больших экспериментальных трудностей и некорректных допущений нельзя считать достаточно убедительными.

В нашей стране различные аспекты тепломассообмена и аэродинамики этого процесса, наряду с автором диссертации, изучал Б.И. Леончик. Результаты исследований Б.И. Леончика расширили представления о процессе испарения капель при лучисто-конвективном теплоподводе и показали перспективность применения таких аппаратов как эффективных и безуносных устройств.

Н.Н. Липатов и В.Д. Харитонов показали, что повышение начальной температуры сушильного воздуха и переход на двухстадийный процесс способствуют снижению потерь тепла и продуктов сушки в виде пылеуноса. Однако оставались неизученными условия выбора предельных значений определяющих параметров процесса.

Исследованиям влияния распыленной жидкости на возникновение циркуляции в камерах посвящены работы Э.Л. Ламма и Э.К. Тыныбекова, В.И. Ганчукова, В.В. Давитулиани. В то же время отсутствуют зависимости, которые учитывали бы циркуляционные течения при расчете распылительных сушильных камер.

Анализ научной литературы показал, что сведения о факторах интенсификации тепломассообмена, характере и источниках циркуляции, вызывающих перенос тепловых и материальных потоков в распылительных камерах, неполны и противоречивы. Отсутствуют рекомендации о выборе наиболее эффективных средств газоочистки, аппаратурно-технологических энерго-ресурсосберегающих схем организации распылительной сушки.

К недостаткам существующих методик расчета распылительной сушки следует отнести узкие пределы областей их применения и недостаточную точность.



Работы А.И. Половинкина и А.М. Дворянкина по синтезу сравнительно простых устройств, В.В. Кафарова и В.П. Мешалкина по оптимизации химико-технологических систем не могут быть в полной мере использованы при выборе рациональной аппаратной структуры и конструктивных решений применяемых узлов в сложных технологических установках, к которым относятся установки распылительной сушки.

## 2. Аэродинамика распылительных камер

Рассмотрены источники циркуляционных течений в камерах. Расчеты с использованием параметров работы промышленных установок показали, что вентиляционный эффект распыливающего диска, тепловая тяга восходящего потока газа и геометрия потолочной части рабочих камер не являются существенными факторами циркуляции.

Разработана теоретическая модель возникновения эжекции газа при торможении капель. Получена аналитическая зависимость (1) для расчета расхода суммарного эжектируемого газового потока при распыливании жидкости, подтверждающая данные экспериментов Э.Л. Ламма

$$\sum V_{r,t} = \frac{m_x}{2400\rho_x d_x} \bar{W}_x \sqrt{C_m} \cdot \tau_{\text{торм}} \quad (1)$$

В результате теоретических и экспериментальных исследований на основе классических представлений и закономерностей теории турбулентных струй автором диссертации установлено, что процесс вовлечения в развивающуюся турбулентную струю распыливающего газа или теплоносителя является основным источником циркуляционных течений в распылительных камерах.

При совместном решении формулы Шлихтинга для описания профилей скоростей в основном участке струи любой формы

$$\frac{w - w_n}{w_m - w_n} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{r_m} \right)^{1,5} \right]^2 \quad (2)$$

и зависимости Г.Н. Абрамовича между избыточной температурой и избыточной скоростью

$$\frac{T - T_n}{T_m - T_n} = \left( \frac{w - w_n}{w_m - w_n} \right)^{0,75} \quad (3)$$

получено выражение, которое устанавливает связь между температурными и скоростными полями,

$$\frac{T - T_n}{T_m - T_n} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{r_m} \right)^{1,5} \right]^{1,5} \quad (4)$$

Анализ экспериментальных данных по исследованию температурных полей в газовом факеле с применением этой зависимости позволяет считать, что характер развития круглой турбулентной чисто газовой струи сохраняется на значительно большей ее длине, чем это известно из литературы, а также не только при сравнительно небольших (<60 м/с), но и при околокритических и критических скоростях истечения газа.

В диссертации доказана возможность применения при решении прикладных задач химической технологии классических зависимостей теории турбулентных газовых струй, полученных Толминым и многократно подтвержденных экспериментально многими учеными.

Применение положений теории турбулентных газовых струй при распылительной сушке обосновано преобладающим влиянием газовой фазы на аэродинамику в камерах, поскольку газодисперсные потоки в камерах являются сильно разбавленными. Объемная концентрация распыленной жидкости в камерах высокотемпературной распылительной сушки и прокатки составляет 0,6-1,2 %, а в конвективных башенных распылительных сушилках не превышает 0,005%.

Расчетами установлено, что может быть введен коэффициент усреднения скорости турбулентной струи в долях от максимальной скорости по оси в соответствующем текущем поперечном сечении:

$$\frac{\bar{w}_{m,r}}{w_0} = \frac{0,96}{a_c x_r} k_y^I; \quad (5) \quad \frac{\bar{w}_{m,r}}{w_0} = \frac{1,2}{\sqrt{\frac{a_c x_r}{b_0}}} k_y^{II} \quad (6)$$

Независимо от расстояния от начала струи он сохраняет свое значение: для осесимметричной круглой струи  $k_y^I = 0,28$  и для плоской щелевой  $k_y^{II} = 0,35$ . Это позволило предложить соотношения для расчета средней по сечению скорости и расхода осесимметричной круглой газовой (7), газодисперсной (8) и кольцевой газовой (10) струй в зависимости от начальной скорости  $w_0$ , плотности присоединяемого газа  $\rho_{r,t}$ , расстояния от начала струи до текущего сечения  $x_r$ , начального радиуса струи  $r_0$  и геометрических размеров газораспределительного устройства (ширина  $b_0$  и средний диаметр  $D_0$  кольцевой щели).

$$V_{\phi,r} = k_y^I \pi \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2} \right)^2 w_{m,r} x_r^2 = 12,79 \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2} \right)^2 r_0 w_0 x_r, \quad (7)$$

$$V_{\phi,r} = \frac{(m_{r,p} w_0 + m_x w_{x0}) x_r r_0 \sqrt{\frac{\rho_{r,p}}{\rho_{r,t}}}}{(m_x + m_{r,p}) K_p} \quad (8)$$

Теоретически исследованы модели формирования факела при истечении кольцевой струи из воздухораспределительного устройства, которое применяется в башенных конвективных распылительных сушилках, как струи с приторцованной зоной разрежения (по Абрамовичу Г.П.), и в виде предложенной в диссертации плоской струи, свернутой в кольцо. Расчеты привели к близким по значениям текущим расходам факела, что указывает на соответствие модели свернутой струи классическим закономерностям теории турбулентных струй.

Однако предложенная модель в отличие от известной имеет практическое значение, поскольку связывает среднюю текущую скорость факела (9) с геометрическими размерами кольцевой щели воздухораспределительного устройства. Это в свою очередь позволяет рассчитывать текущие расходы факела (10), кратность циркуляции, время пребывания в камере и ее размеры.

Расчеты показали, что развитие факела при истечении струи происходит в результате эжекции к корню струи восходящего вдоль стенок камеры потока газа, который формируется за счет вовлечения в него газа из ядра, из периферийной части факела, а также из зоны, расположенной за пределами сечения встречи факела со стенками камеры.



$$\bar{w}_{\phi, \tau} = \frac{0,42 w_0}{\sqrt{\frac{a}{b_0} (x_{\tau} + x_0)}} \sqrt{\frac{\rho_{r0}}{\rho_{r, \tau}}} \quad (9)$$

$$m_{\phi, \tau} = \frac{0,33 w_0 \rho_{r, \tau} \left[ D_0 + 2 \left( x_{\tau} + \frac{b_0}{\operatorname{tg}(\alpha_{\phi} / 2)} \right) \operatorname{tg}(\alpha_{\phi} / 2) \right]^2}{\sqrt{\frac{a_c}{b_0} \left( x_{\tau} + \frac{b_0}{\operatorname{tg}(\alpha_{\phi} / 2)} \right)}} \sqrt{\frac{\rho_{r0}}{\rho_{r, \tau}}} \quad (10)$$

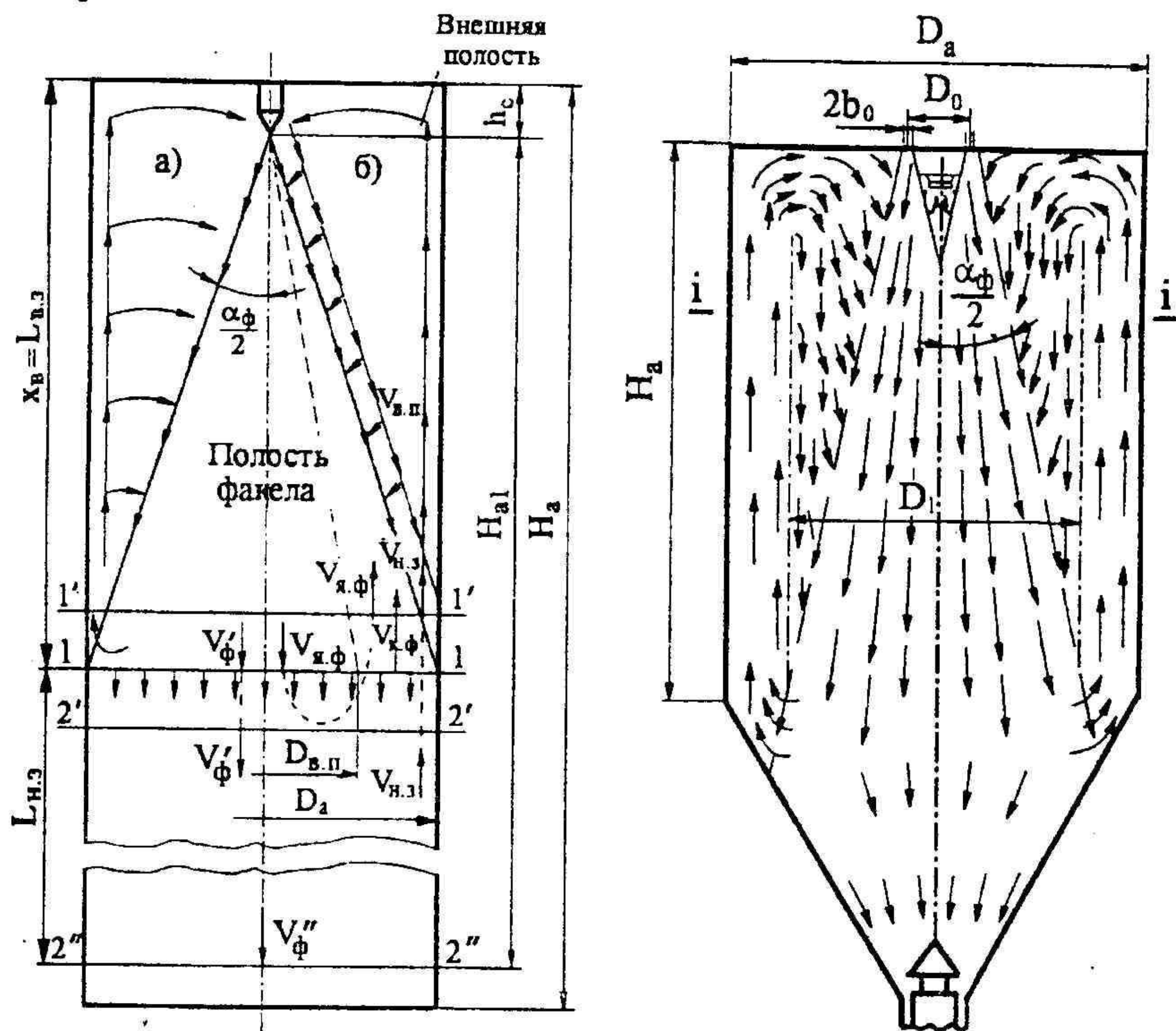


Рис. 1. Материальные потоки в форсуночной распылительной камере и схемы формирования факела: а) из восходящего потока; б) из нисходящей ветви циркулирующего потока

Рис. 2. Схема циркуляции в башенной распылительной сушилке.

Таким образом, непосредственно в факельной зоне и между факельной и зафакельной зонами возникает циркуляция (рис. 1, 2)

Интенсивность циркуляции предложено характеризовать массовым  $k_{\phi м}$  и объемным  $k_{\phi в}$  показателями кратности циркуляции как отношений расхода факела к начальному расходу струи. Для наиболее распространенных условий истечения в форсуночных камерах показатели имеют значения:  $k_{\phi м}=22-41$ ,  $k_{\phi в}=65-177$ . При этом кратность обмена в объеме внешней полости между конусом факела и стенками ци-

линдрической камеры составляет  $k_{\phi в}=4-22$ . В промышленной камере конвективной сушилки установки РСУ-1000 кратность циркуляции может составлять  $k_{\phi в}=6,3-12,7$  в зависимости от условий подачи теплоносителя. Постоянная замена объемов среды при циркуляции предотвращает возникновение застойных зон в камерах и в необходимых случаях обеспечивает взрывобезопасность процесса.

На основе разработанной теоретической модели взаимодействия факела, образованного истечением круглой осесимметричной струи, со стенкой камеры в сечении встречи предложены зависимость максимальной скорости восходящего вдоль стенок потока  $W_{в.п. \max}$  и методика расчета его толщины.

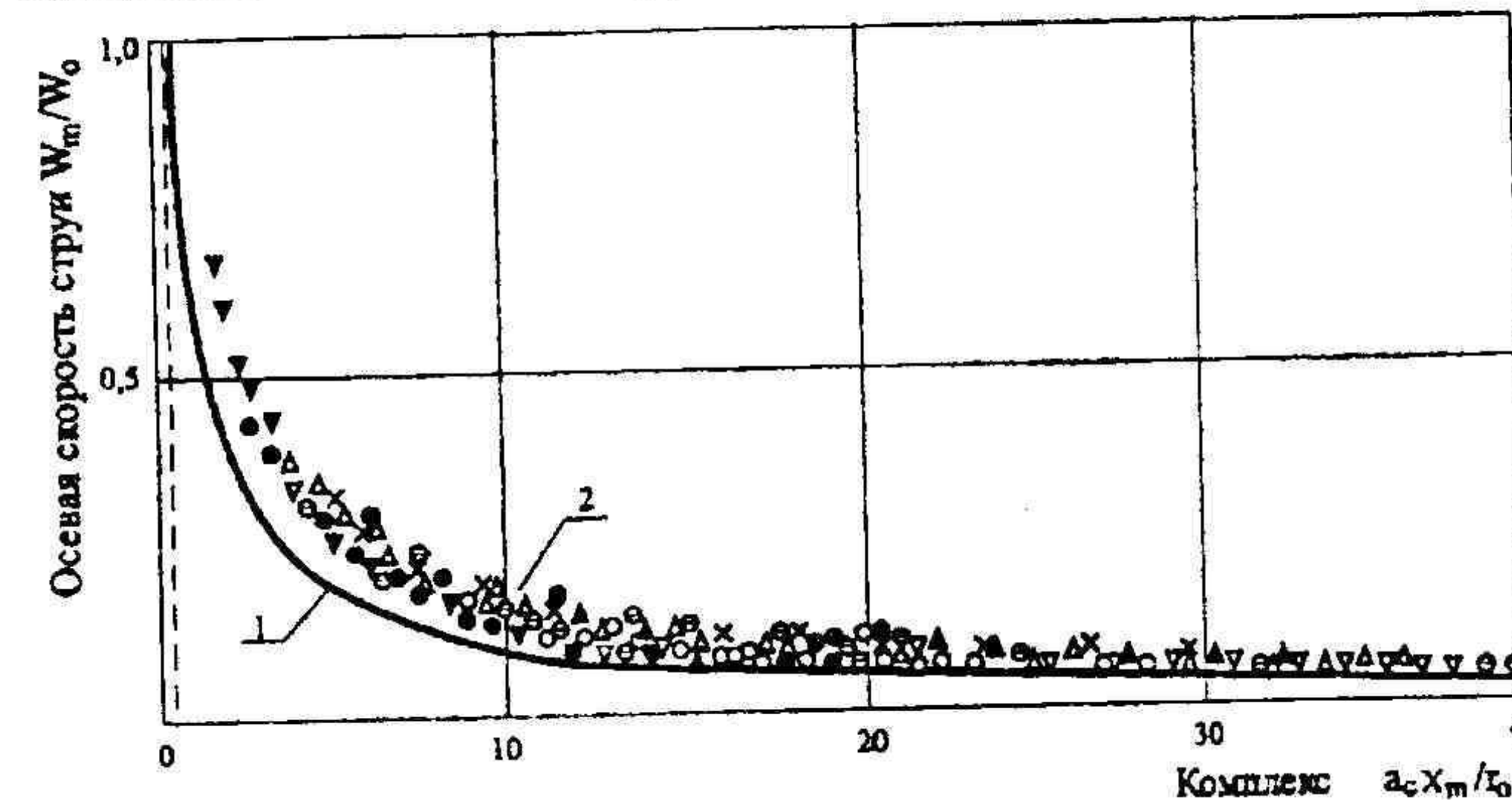


Рис. 3. Изменение осевой скорости круглых газодисперсной и газовой струй; 1 – кривая изменения чисто газовой струи; 2 – область экспериментальных данных для газодисперсной струи ( $g_{уд} = 0,5-1,0$  кг/кг;  $m_{ж} = 10; 15; 20$  кг/ч)

Для газового и газодисперсного холодного и испаряющегося факелов в широком диапазоне параметров высокотемпературной-распылительной сушилки ( $g_{уд}=0,5-1,0$  кг/кг,  $t_{в0}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $w_0 = 255-317$  м/с,  $t_{гр}=400-900^{\circ}\text{C}$ ) толщина и скорость восходящего потока соответственно составили 53-88 мм и 9-29,6 м/с.

С целью установления влияния движущихся капель в турбулентной струе газа и процесса их испарения на характер развития турбулентной струи введено понятие приведенной начальной скорости истечения. Она соответствует скорости некоторой затопленной газовой струи, расход которой в текущем поперечном сечении равен расходу струи при условии полного обмена количеством движения между каплями и газом.

$$w_{в.п. \max} = w_0 \frac{0,96}{a_c x_s} \left( 1,062 - 5,797 \frac{D_{в.п.}}{2x_s} \right) \quad (11)$$

Расчеты показали, что в случае больших скоростей истечения радиальная скорость  $f_r$  потока газа, наполняющего факел, направленного со стороны внешней конической поверхности к оси струи, значительна (6-35 м/с), что может оказывать влияние на характер движения и распределения капель в газодисперсном факеле.

Проведены экспериментальные исследования скоростей движения осевых капель и плотности орошения распыленной жидкостью поперечного сечения камеры, в которой осевая газодисперсная струя образуется пневматической форсункой внутреннего смещения.

Экспериментальные данные по скоростям и времени движения групп осевых капель обобщены зависимостями

$$w_{x.m} = 0,014 w_{св0} \frac{m_{r.p.}}{m_{ж}} \cdot \left( 10^3 \frac{d_0}{x_m} \right)^{1,33} \quad (12)$$



$$\tau_{km} = \frac{m_x (x_{m2}^{2,33} - x_{m1}^{2,33})}{318,7 W_{cm0} m_{gp} (d_0)^{1,33}}, \quad (13)$$

где  $x_{m1}$  до  $x_{m2}$  расстояния от среза сопла форсунки до соответствующих поперечных сечений распылительной камеры.

Осевые капли (рис.3) в момент истечения газодисперсной струи из пневматической форсунки внутреннего смещения имеют скорость, равную скорости газа, затем опережают газовую струю. По мере ее развития и торможения капле скорости газа и капле сближаются.

По аналогии с известным понятием – «изохор» как линий равных скоростей по длине струи, введено понятие «изоденс» - линий равных плотностей орошения в поперечном сечении.

Предложена экспериментальная зависимость (14) для определения характера распределения распыленной жидкости в газовой струе по положению изоденс  $k_g = g'/g'_m$  относительно соответствующих изохор  $k_w = w/w_m$  при изменении в широких пределах относительного расстояния от среза сопла  $x/r_0 = 10 - 366$ .

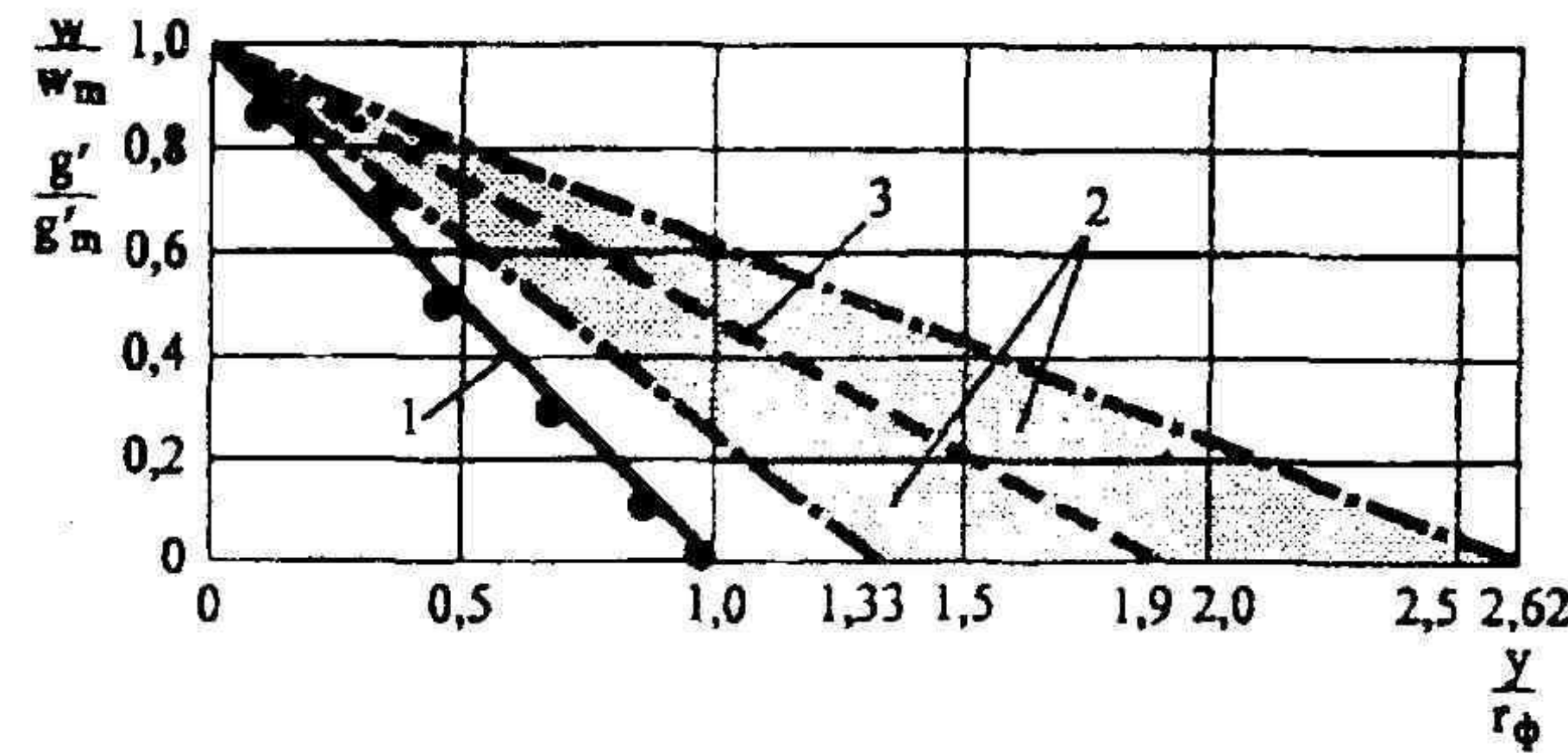


Рис.4. Положение относительно оси факела изохор газовой струи  $k_w = w/w_m$ , не содержащей примеси (•), и средних экспериментальных значений плотности орошения в поперечном сечении газодисперсного факела – изоденс  $k_g = g'/g'_m$ , в глухой цилиндрической камере

1 – газовая струя без примесей; 2 – область разброса экспериментальных данных по плотности орошения; 3 – средние значения безразмерной плотности орошения;  $y$  – текущая радиальная координата от оси струи в поперечном сечении камеры.

$$\frac{k_w}{k_g} = \frac{a_c x_s m_{gp} g'_m \rho_x}{0,96 m_x w_{cm0} \rho_{gp}} \quad (14)$$

При  $m_x/m_{gp} = 0,3 - 1,0$ , скорости истечения смеси из сопла форсунки  $w_{cm0} = 118,4 - 189,3$  м/с.

Характер изменения плотности орошения распыленной жидкостью вплоть до сечения встречи газодисперсного факела со стенками камеры по радиусу струи подчиняется графической зависимости (рис.4) и свидетельствует об интенсивном центробежном перераспределении капле, усиленном движением пристенной восходящей ветви циркулирующего потока газа.

Разработаны энергетическая модель и методика расчета процесса диспергирования жидкости и параметров регулируемой пневматической форсунки внутреннего смещения, как наиболее удобного технического средства распыливания и интенсификации теплообмена в распылительной камере с высокотемпературными стенками. Получена графическая зависимость для определения давления истечения из сопла при заданной относительной степени первичного диспергирования, которая позволяет управлять дисперсностью распыливания и интенсивностью циркуляции в камере.

Расчеты энергетического баланса движения потоков газа в распылительной высокотемпературной сушильно-прокалочной форсуночной камере и в конвективной башенной сушилке показали, что энергетическая достаточность источников циркуляции обеспечивает характер полновитковой циркуляции по схеме на рис.16 и рис.2

Благодаря применению коэффициента усреднения скорости и возможности расчета расходов факела и циркулирующих потоков при истечении струи, получены зависимости для определения времени пребывания газовой фазы до текущего поперечного сечения камеры  $\tau_{г.т.}$ : для осесимметричной круглой струи (15) и для кольцевой струи (16). Время пребывания за один ход  $\tau_n$  от начала струи до сечения встречи со стенкой камеры (рис.1) определяется при  $x_{г.т.} = x_b$ . Изменяя скорость истечения струи, размеры отверстия сопла, кольцевой щели газораспределительного устройства и диаметр камеры, можно управлять циркуляцией газа и частиц и временем пребывания.

Время пребывания газовой ячейки за один виток циркуляции (17) рассчитывается с учетом средней скорости восходящего потока  $w_{в.п.}$ , исходя из скорости в сечении встречи (11) и характера изменения его расхода по высоте камеры (7,8). Время пребывания частиц за один виток  $\tau_{ц.ч}$  циркуляции в нисходящем и восходящем факелах может быть определено по формуле (18).

$$\tau_{г.т.} = \frac{a_c (x_t + x_0)^2}{0,56 r_0 w_0} \quad (15)$$

$$\tau_{г.т.} = \frac{1,25 \sqrt{\frac{a_c}{b_0}} (x_t + x_0)^{1,5} \rho_{г0} (D_n^2 - D_s^2)}{m_0 \sqrt{\frac{\rho_{г0}}{\rho_{г.т.}}}} \quad (16)$$

$$\tau_n = \frac{x_n}{w_{в.п.}} + \tau_{г.т.} \quad (17)$$

$$\tau_{ц.ч} \approx 1,25 \tau_{ц.п} + \frac{H_n}{w_{в.п.} - w_{н.т.}} + \frac{0,25 H_n}{w_{с.п.} + w_{н.т.}} \quad (18)$$

Таблица

Расчетное время пребывания в камере при подаче сушильного воздуха в виде единичной кольцевой струи (Размеры камеры установки РСУ-1000:  $H_n = 9,15$  м;  $D_n = 7,2$  м;  $V_n = 372$  м<sup>3</sup>)  
Расход сушильного воздуха  $m_n = 34545$  кг/ч

Воздухораспределительное устройство	Размеры (рис.2)		Начальная скорость воздуха $w_0$ , м/с	Время пребывания газовой ячейки в нисходящем газовом факеле (один ход), $\tau_n$ , с	Частица среднего размера $d_n = 50 \cdot 10^{-6}$ м в факеле			
	$D_0$	$b_0$			в нисходящем		в восходящем	
					Один ход, $\tau_{ч.п.}$ , с	Один виток, $\tau_{ц.п.}$ , с	Один ход, $\tau_{ч.в.}$ , с	Один виток, $\tau_{ц.в.}$ , с
1	1,04	0,065	28,2	2,5	1,7	9,5	2,44	11,44
2	1,1	0,034	50,5	1,53	1,35	7,1	1,76	8,12
3	0,65	0,057	50,5	1,15	1,04	6,55	1,27	7,03
4	0,715	0,025	106,8	0,85	0,78	4,9	0,90	5,12
5	0,85	0,075	29,7	2,11	1,8	-	2,57	-

Научная библиотека  
УГЛТУ  
г. Екатеринбург



Время пребывания частиц в нисходящей (спутной) факелу ветви витка циркуляции  $\tau_{ч.сп.}$  в формуле (18) рассчитывается с учетом положения границ и расходов восходящей (пристенной) и спутной ветвей циркулирующего потока.

В табл. приведены расчетные данные, свидетельствующие о том, как сильно влияют геометрические размеры кольцевого воздухораспределительного устройства для подачи теплоносителя в конвективную башенную сушилку и скорость его истечения на время пребывания газовой ячейки и частицы при нисходящем (прямоток) и восходящем (противоток) факелах теплоносителя. При малых скоростях истечения время пребывания в факеле теплоносителя может быть увеличено многократно. При уменьшении начальной скорости струи от 50 м/с до 10 м/с время пребывания газовой ячейки в камере РСУ-1000 увеличивается от 1,5с до 11-13,5с в зависимости от соотношений размеров кольцевой щели воздухораспределительного устройства.

Предложена формула (19) для расчета вероятностного времени пребывания ячейки среды с учетом кратности циркуляции  $k_{фв} = V_{ф.т.}/V_0$  в камере  $\tau_{в.ц.}$

$$\tau_{в.ц.} = \frac{\tau_{ц.}}{2V_0} (V_{в.п.} - V_0) \quad (19)$$

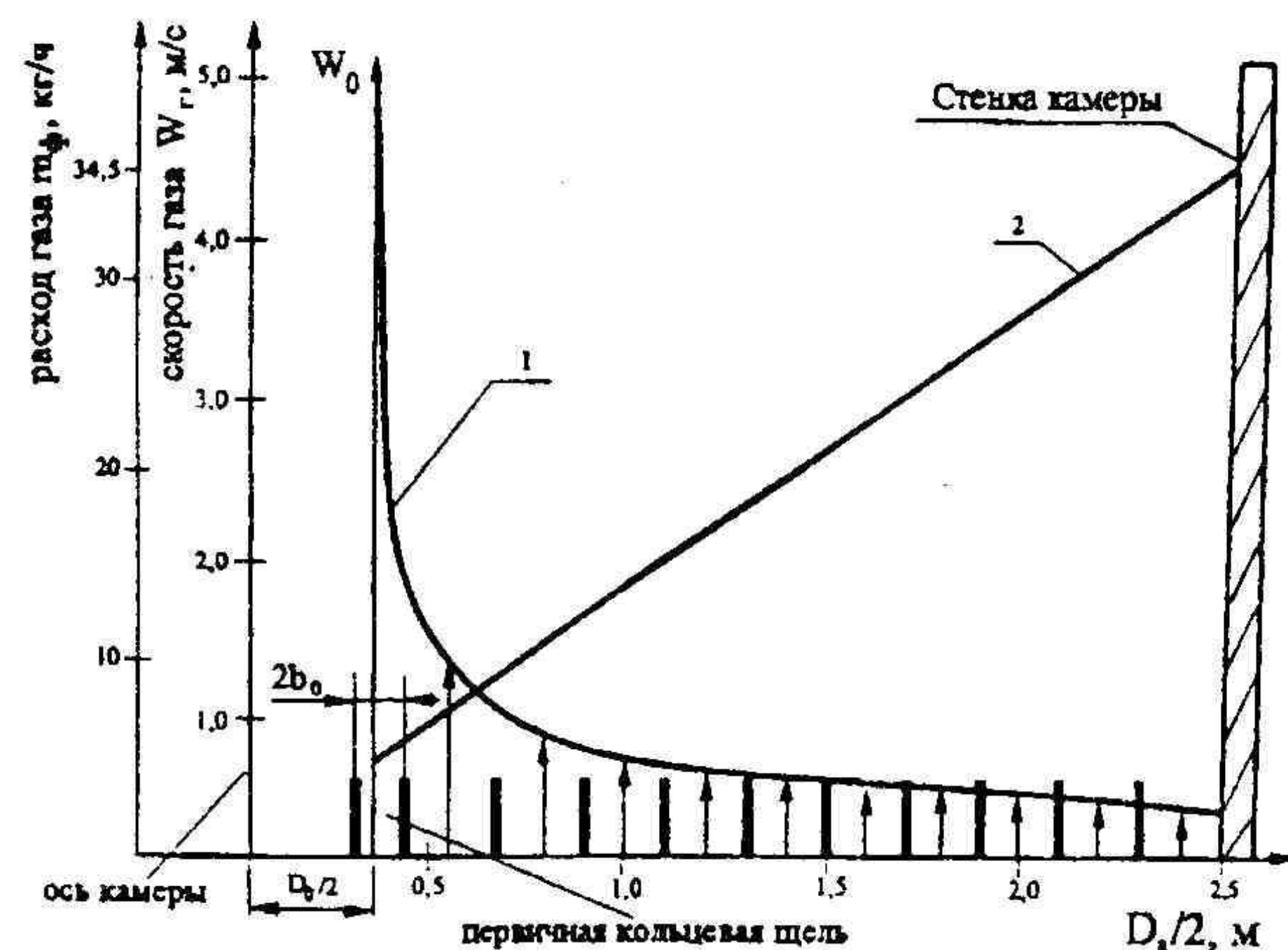


Рис.5. График распределения расхода газа по диаметру камеры при самодостаточной системе кольцевых струй; 1 — кривая изменения скорости кольцевых вторичных струй  $w_{п.}$ ; 2 — кривая суммирования заданного расхода теплоносителя  $m_{ф}$

Суммированный расход газа для каждого сечения факела равен текущему расходу, рассчитанному по формуле (10),  $m_{ф} = m_{ф.т.}$

Применение самодостаточной системы струй позволит практически существенно уменьшить циркуляцию, приведет к увеличению времени пребывания, повышению движущей силы и интенсивности тепломассообменных процессов, к увеличению производительности аппаратов, снижению габаритов камер и энергозатрат. Так, в нисходящем факеле время пребывания газовой ячейки увеличится до 13,3 с, частицы среднего размера  $d_q = 50 \cdot 10^{-6}$  м до 6,2 с.

Разработана методика расчета параметров системы.

Установленные закономерности увеличения расхода газового факела по мере его развития (7,8,10) определили возможность создания самодостаточной системы кольцевых струй. Предложено распределять расход газа по диаметру камеры в соответствии с закономерностью нарастания текущего расхода турбулентной газовой струи для заданного расхода факела теплоносителя, формируемого его первичной струей при значительно меньших расчетных начальных значениях ее расхода и скорости (рис.5). Суммиро-

### 3. Факторы интенсификации тепломассообмена при распылительной сушке

Выполнен анализ интенсивности теплообмена в зоне активного испарения с использованием кинетической кривой промышленного процесса конвективной распылительной сушки молока и расчетных данных о времени и характере движения капель при дисковом распыливании.

Протяженность зоны активного испарения, где испаряется до 80-90% всей влаги, составляет 7-10% от высоты сушильной камеры, а расчетное время пребывания капель в ней 2-2,5% от полного времени пребывания в аппарате за один ход теплоносителя (от потолка до выходного сечения камеры).

Установлено, что интенсивность теплообмена в этой зоне характеризуется высоким значением числа Nu, которое составляет 10,8 в момент отрыва капель от диска и уменьшается до предельного значения  $Nu=2$  при торможении капель (рис.6).

В результате расчетов, выполненных с применением различных подходов, в том числе с применением диффузионной модели испарения, методики газодинами-

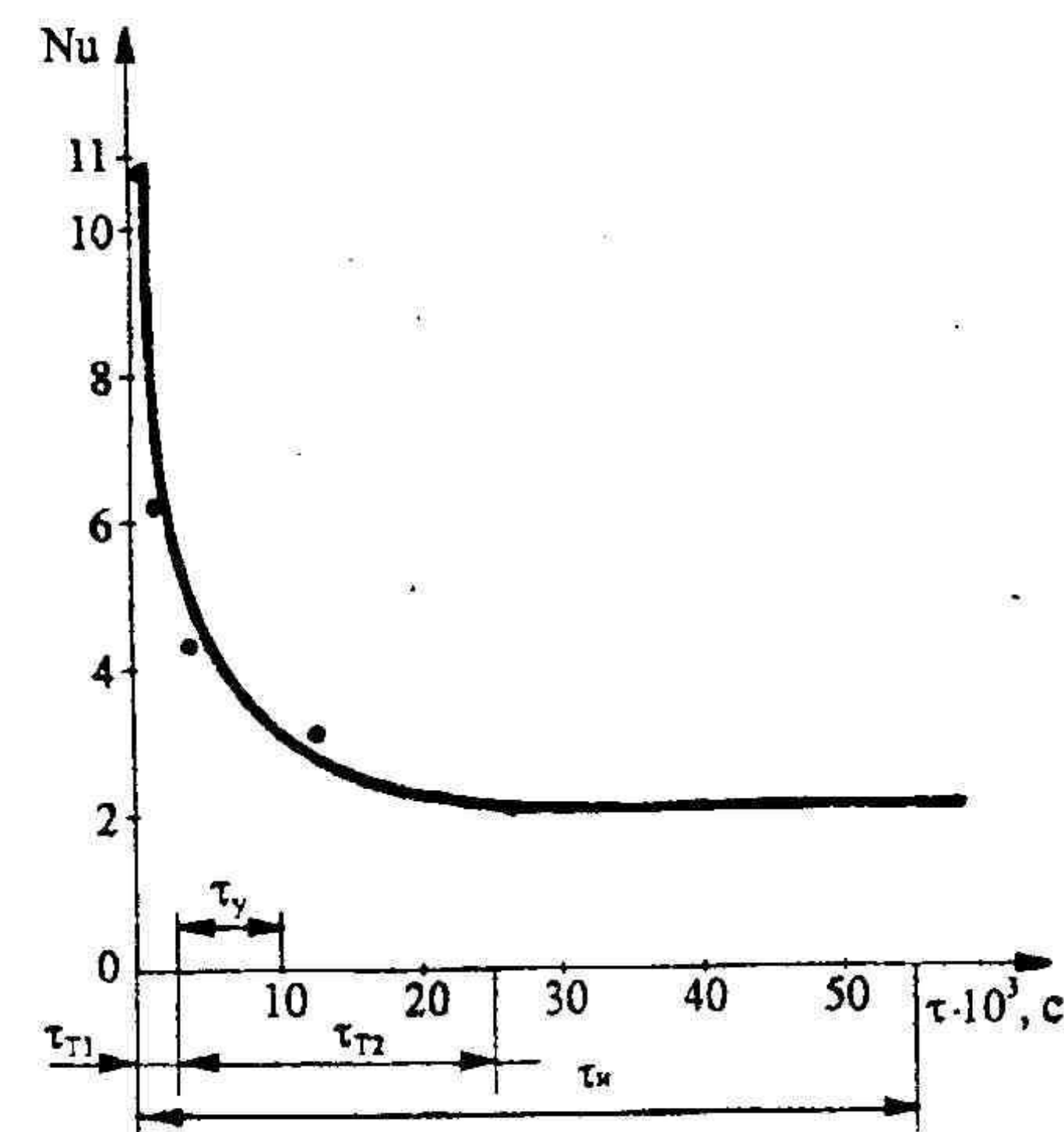


Рис.6. Зависимость интенсивности теплопередачи к капле в зоне активного испарения  $\tau_{т1}$  — время горизонтального полета капли от распыливающего диска до внутренней границы струи газа;  $\tau_{у}$  — время ускорения капли струей газа-теплоносителя;  $\tau_{т2}$  — время полного торможения капли в горизонтальном направлении;  $\tau_{и}$  — время пребывания капли в зоне активного испарения.

ческого взаимодействия капель с потоком газа и методики приведенной пленки, получены близкие средние для пути торможения капель значения  $\overline{Nu} = 5-6$ .

Расчеты с применением экспериментальных данных показали, что реальный процесс сушки в результате резкого снижения температуры теплоносителя в зоне активного испарения испытывает дефицит тепла, дополнительный подвод которого к зоне ограничен условиями аэродинамики. Поддерживая высокую температуру газа

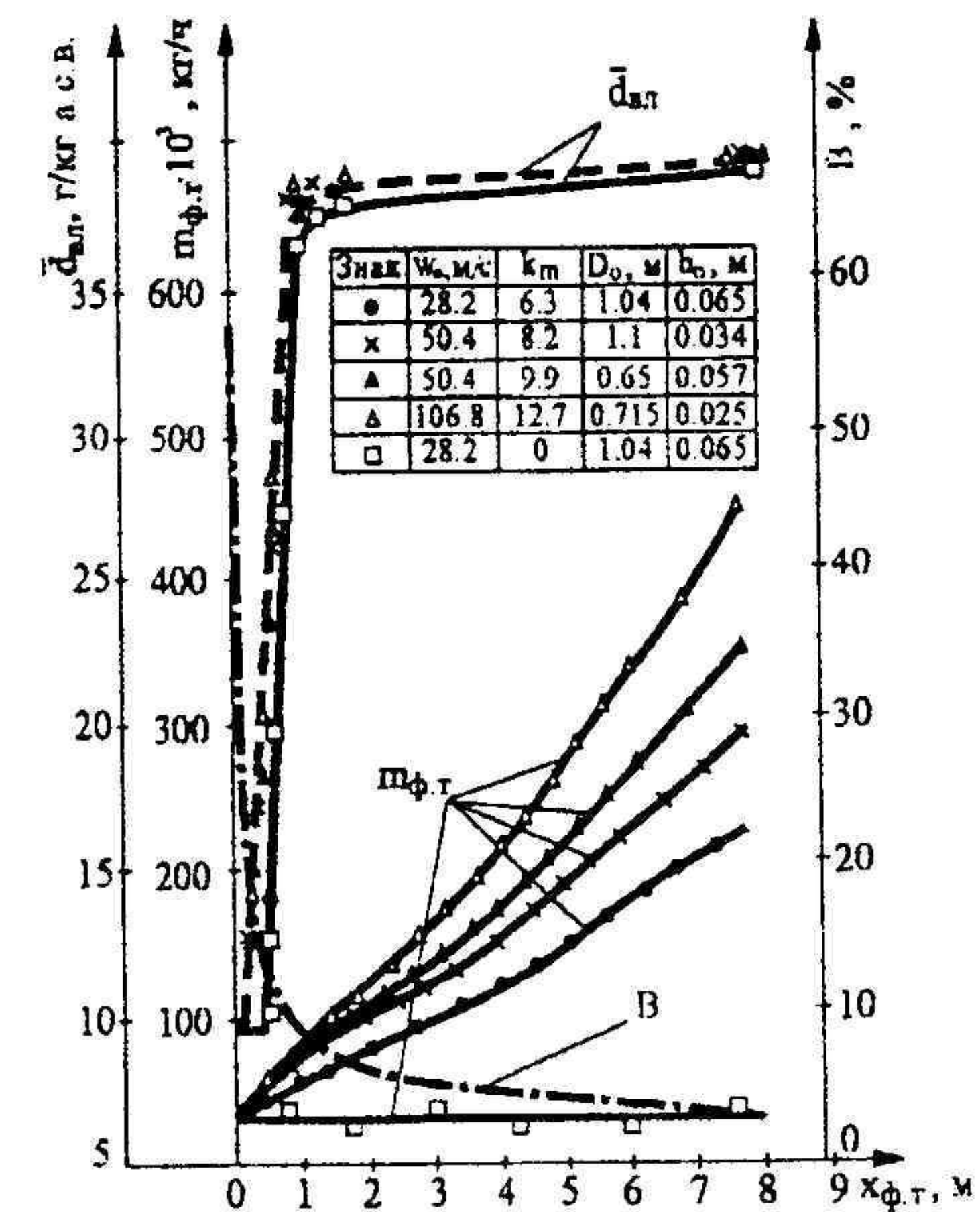


Рис.7. Параметры сушильного воздуха и влажность продукта по высоте распылительной конвективной сушильной камеры



на участке зоны с высокими значениями числа Nu, можно многократно увеличить производительность камеры по испаренной влаге.

В результате аналитических исследований с применением экспериментальной кривой распылительной сушки молока установлено, что, благодаря интенсивному испарению, влажность сушильного воздуха уже на границы зоны активного испарения, при полном расходе сушильного воздуха через начальное сечение воздухораспределительного устройства даже в отсутствии циркуляции достигает близкого к конечному значения (рис.7, □ – гипотетический режим без циркуляции в камере установки РСУ-1000). Поэтому, усилия по снижению циркуляции в камере ниже этой зоны не могут привести к заметному повышению движущей силы массообмена.

Предложена методика расчета высоты конвективной сушильной камеры по предварительно экспериментально определенным средним по сечению камеры значениям влажности продукта и температуры среды на участке второй скорости суши-

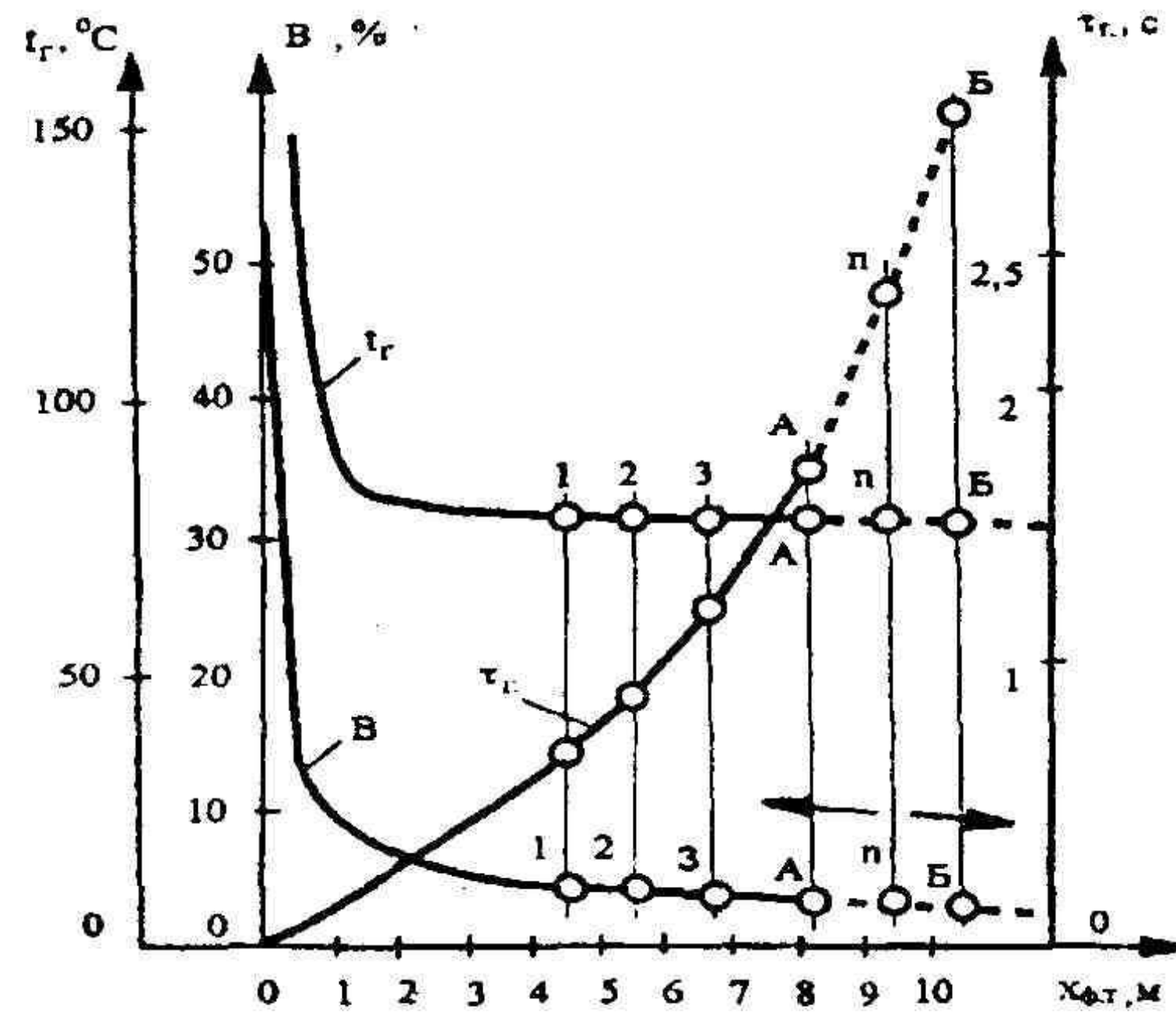


Рис.8. Зависимость текущей влажности продукта В, температуры сушильного газа  $t_r$  и времени пребывания  $\tau$  от расстояния  $x_\phi$  между срезом кольцевой щели для подачи теплоносителя и текущим поперечным сечением факела

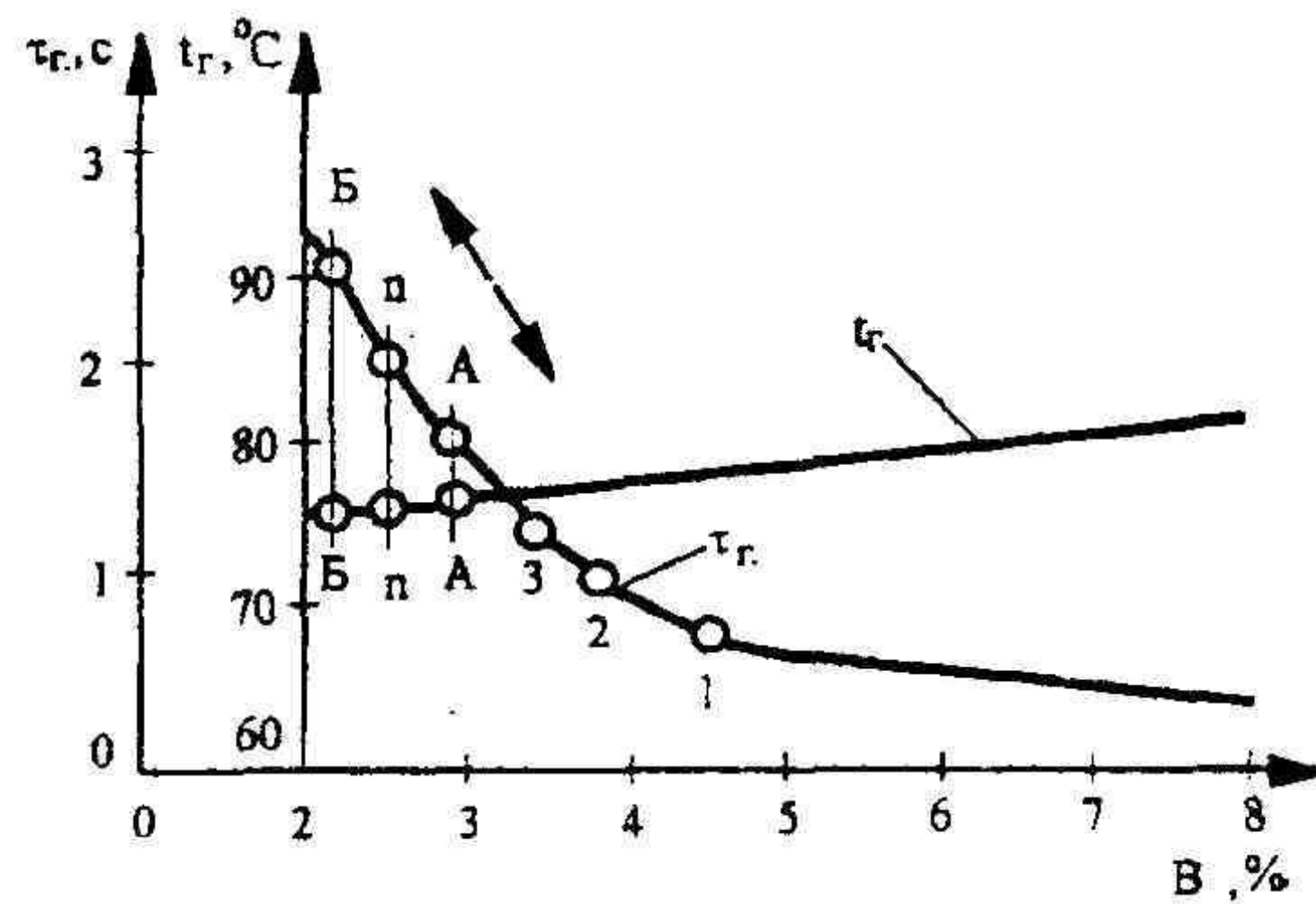


Рис.9. Влияние температуры газа  $t_r$  и времени пребывания  $\tau$  в камере на текущую влажность продукта В

ки и расчетному времени пребывания среды от начала струи до соответствующих сечений камеры, где проводились измерения. Время пребывания рассчитывается с применением зависимостей, установленных на основе теории турбулентных струй.

В трех сечениях камеры 1,2,3 (рис.8) в зоне второй скорости суши экспериментально определяют средние значения текущей влажности продукта В, и соответствующих им температур сушильного воздуха. По закону изменения влажности продукта на участке 1-2-3 экстраполируют кривую в область интервала задаваемых конечных значений влажности продукта (точки А, Б). С достаточной для инженерных расчетов точностью, можно принять линейный характер изменения влажности продукта на участке второй скорости суши. Рассчитывают значения времени пребывания до заданных сечений камеры по формулам (15-19). Затем, применяя систему координат  $t_r$ – В, кривые трансформируют в графики (рис. 9), по которым, перемещаясь в области А-Б, определяют необходимое время пребывания для достижения точного значения конечной влажности продукта (точка п) и соответствующую ей конечную температуру теплоносителя. Экспериментальные данные могут быть получены на лабораторных

или промышленных установках с аналогичной схемой потоков сред в распылительных камерах. Методика в полной мере учитывает специфику кинетики распылительной сушки конкретных видов растворов при получении полифракционных продуктов с заданной средней влажностью.

На основе предложенной теоретической модели формирования самодостаточной системы кольцевых струй разработана методика расчета безциркуляционных камер распылительной сушки с подачей первичной высокотемпературной струи сушильного воздуха. Анализ показывает, что в сравнении с распылительными трубами-сушилками Бадфорда и Бригса с кольцевой подачей вторичного воздуха для устранения циркуляции, удельный расход сушильного воздуха на 1 кг испаренной влаги может быть уменьшен с 95,7 кг/кг до 33,5 кг/кг. В безциркуляционной камере в сравнении с башенной сушилкой при меньшем удельном расходе сушильного воздуха длительность пребывания может быть увеличена в 10-12 раз.

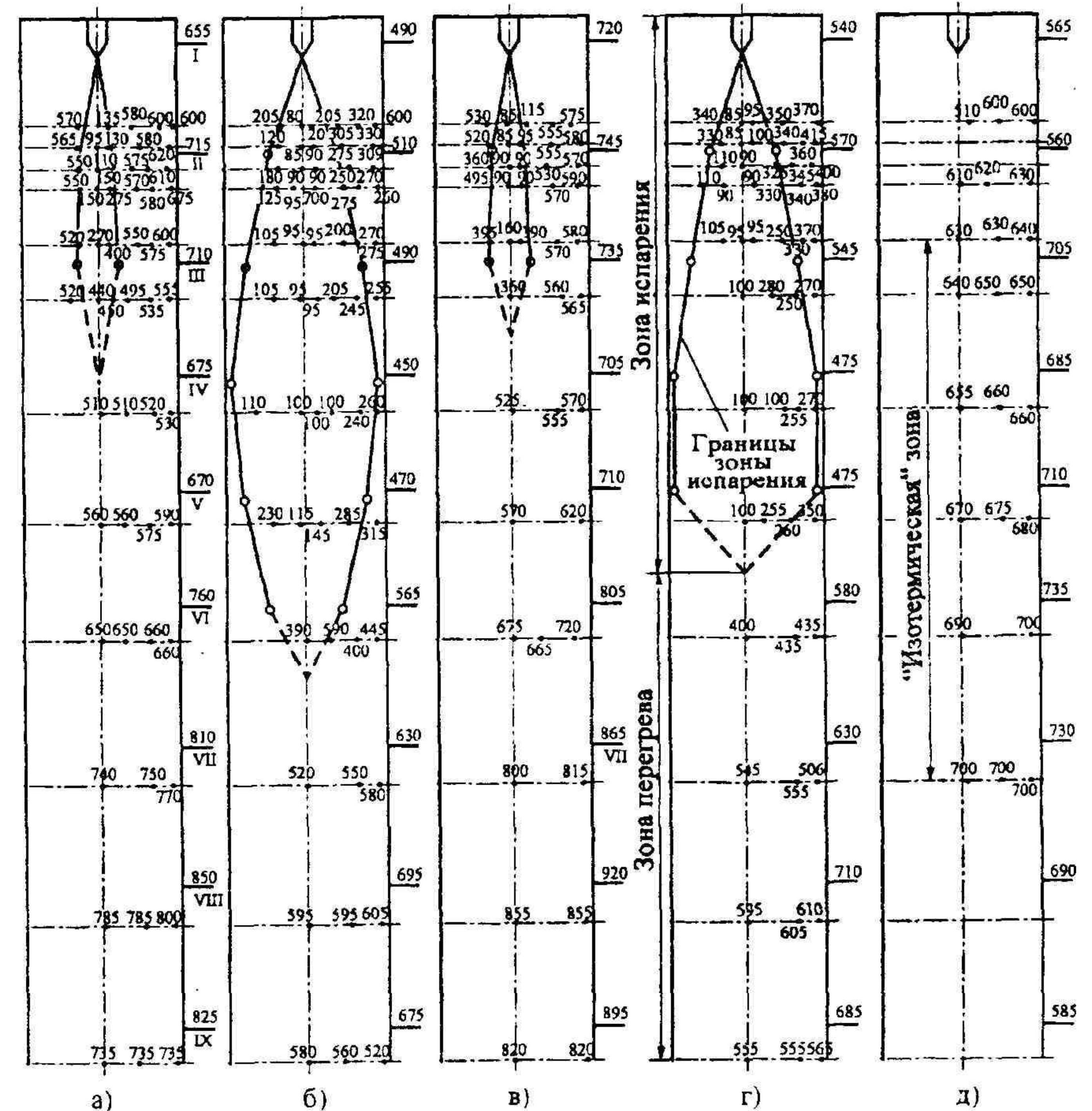


Рис.10. Типовые графики температурных полей и контуров границ испарения факелов распыла (температуры в °С).

а)  $m_{ж} = 15$  кг/ч;  $m_{г.р.} = 12$  кг/ч; б)  $m_{ж} = 20$  кг/ч;  $m_{г.р.} = 18$  кг/ч; в)  $m_{ж} = 20$  кг/ч;  $m_{г.р.} = 20,2$  кг/ч; г)  $m_{ж} = 20$  кг/ч;  $m_{г.р.} = 10,1$  кг/ч; д) продувка воздухом  $t_a = 20^\circ\text{C}$ ;  $m_a = 12,1$  кг/ч



Экспериментально исследованы температурные поля и границы испарения факелов распыленной воды в форсуночной камере с теплоподводом от высокотемпературных стенок (рис. 10). Камера представлена в виде двух зон: зоны испарения и зоны перегрева парогазового потока, в которой осуществляется термическая обработка сухих частиц продукта, поступающих из верхней зоны при сушке технологических растворов.

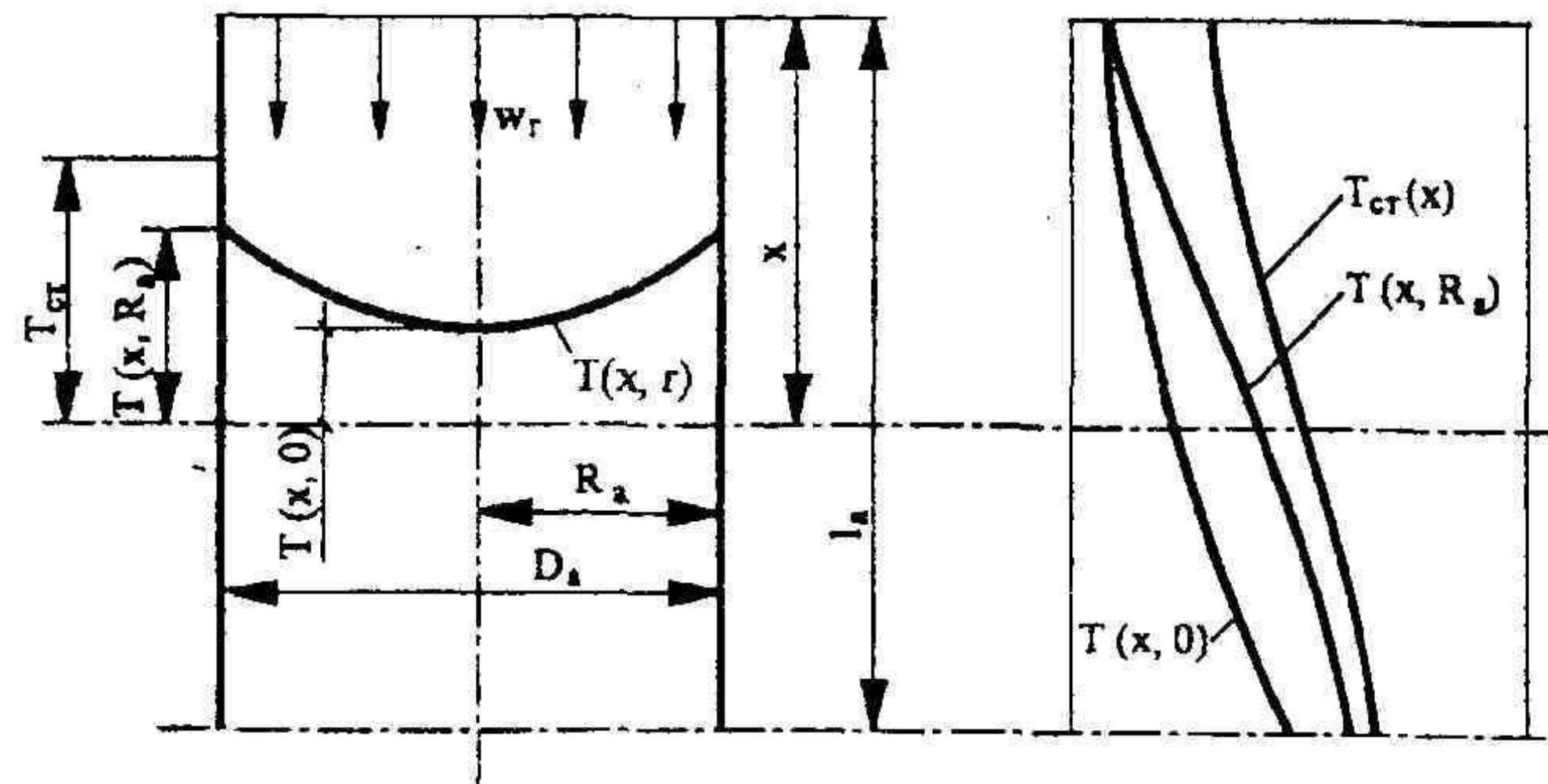


Рис. 11. К определению теплообмена турбулентного потока поглощающей среды со стенками аппарата в зоне перегрева  $T(x, 0)$  – соответствуют оси камеры

дисперсный факел в трубчатой камере с высокотемпературными стенками как среду с «отрицательными источниками тепла». В качестве аналога принят предложенный С.Н. Шориным метод математического описания сложной теплопередачи от высокотемпературного газового факела к стенке цилиндрического канала с использованием обобщающего коэффициента температуропроводности  $a^*$ , соответствующего обобщающему коэффициенту теплопроводности  $\lambda^* = (\lambda_{луч} + \lambda_{турб})$ , учитывающему лучистый и турбулентный переносы тепла.

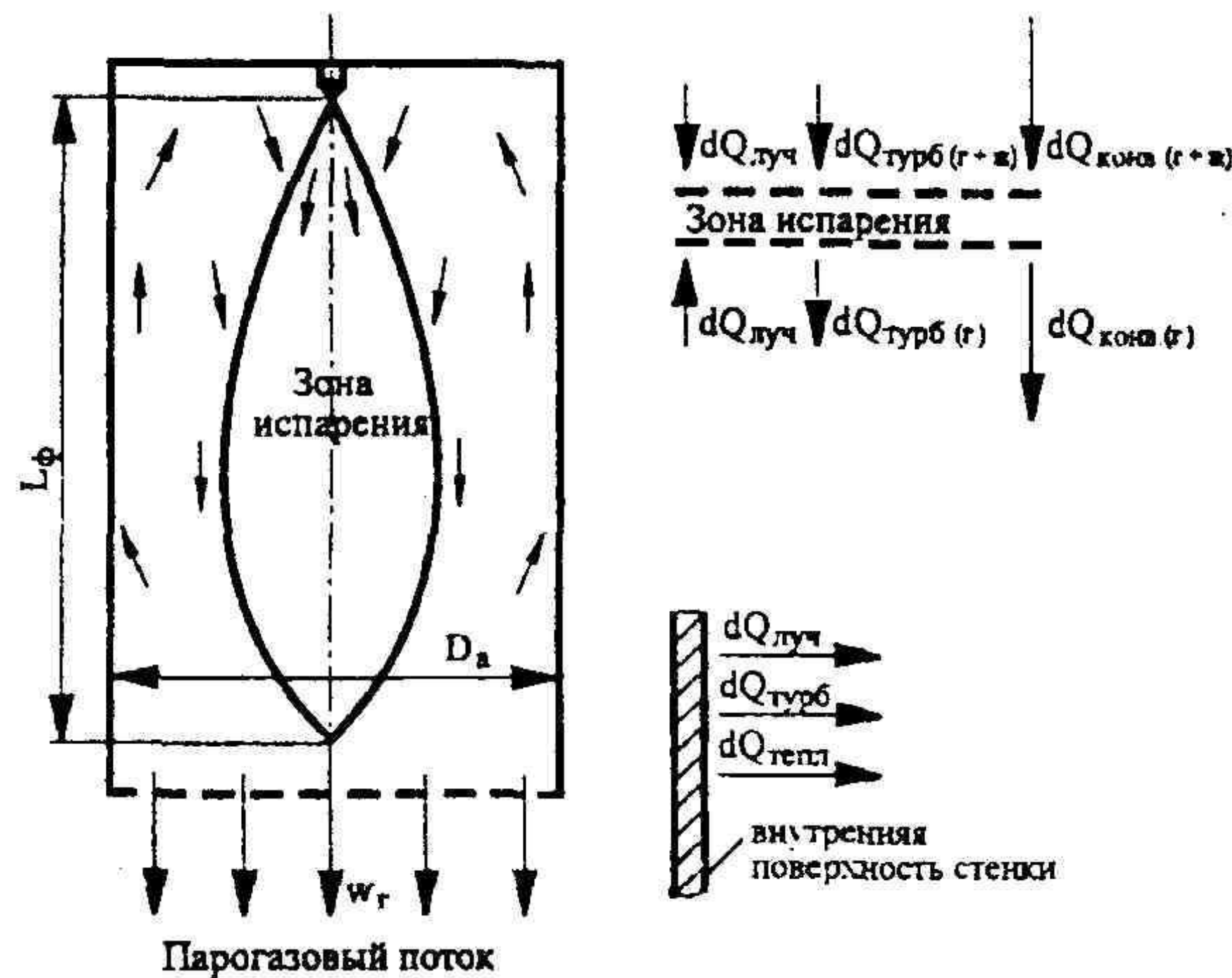


Рис. 12. Схема тепловых и материальных потоков в зоне испарения факела распыленной жидкости

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{w_c}{a^*} \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, \quad (20)$$

При анализе уравнения (20) с применением теории подобия получены функциональные зависимости безразмерных параметров с учетом изменения направления теплового потока от стенки камеры, вызванного поглощением тепла при испарении

рени распыленной жидкости в канале. В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения для расчета длины зоны испарения факела (21), температуры в конце зоны (22) и длины расположенной непосредственно за зоной испарения зоны перегрева среды, где происходит термическая обработка (прокалка) частиц продукта (23).

Автор диссертации рассмотрел испаряющийся газодисперсный факел в трубчатой камере с высокотемпературными стенками как среду с «отрицательными источниками тепла».

Для принятой модели применяется уравнение переноса в частных производных в цилиндрических координатах (20), полученное из дифференциального уравнения Фурье-Кирхгофа

Здесь  $T_{пр}$  – приведенная температура – это потенциальная температура, которую приобрела бы среда в конце зоны испарения при условии, что теплота испарения израсходована на перегрев среды от фактической конечной температуры. Расчетно-экспериментальная оценка показала, что лучистый теплоперенос в долях от конвективного потока тепла к осевым каплям в факеле, дальность полета которых определяет длину зоны испарения, в зависимости от условий процесса составляет от 0,53 до 10,3 %. Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными ранее Гоффманом и Гаувином.

Здесь  $T_{пр}$  – приведенная температура – это потенциальная температура, которую приобрела бы среда в конце зоны испарения при условии, что теплота испарения израсходована на перегрев среды от фактической конечной температуры. Расчетно-экспериментальная оценка показала, что лучистый теплоперенос в долях от конвективного потока тепла к осевым каплям в факеле, дальность полета которых определяет длину зоны испарения, в зависимости от условий процесса составляет от 0,53 до 10,3 %. Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными ранее Гоффманом и Гаувином.

$$\frac{L_{\phi}}{D_a} = \exp\left(-0,53 \frac{\bar{T}'_{ст}}{T'_1}\right) Fr^{0,29} \left(0,170 + 0,015 \frac{D_a k_{к0}}{\Gamma_{к0} \rho_{ж}}\right); \quad (21)$$

$$\frac{T_{пр} - T'_1}{\bar{T}'_{ст} - T'_1} = \left(\frac{\bar{T}'_{ст}}{T'_1}\right)^{-0,81} Fr^{-0,265} \left(174,4 - 5,3 \frac{D_a k_{к0}}{\Gamma_{к0} \rho_{ж}}\right); \quad (22)$$

$$\frac{l_a}{D_a} = \exp\left[0,69 \frac{\bar{T}_2 - \bar{T}_1}{\bar{T}_{ст} - \bar{T}_{1,2}}\right] (0,934 - 0,522 \cdot 10^{-6} Fr). \quad (23)$$

Балансы материальных и тепловых потоков с использованием экспериментальных данных подтверждают структуру материального и теплового межзонального переноса и схему циркуляции (Рис. 1б), установленную при исследовании аэродинамики.

За счет турбулизирующего действия струи интенсивность конвективного теплопереноса от высокотемпературной стенки к среде достаточно высока. В широком диапазоне технически реализуемых параметров коэффициенты теплоотдачи от стенки, рассчитанные с учетом лучистого и конвективного межзонального переноса тепла и потерь, автомодельны относительно скорости истечения струи и имеют средние значения: в факельной зоне с учетом конвективного переноса тепла восходящим вдоль стенок камеры потоком газа  $\alpha_k = 112 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}$  и в зоне перегрева  $\alpha_k = 79 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}$ . Для высокотемпературных трубчатых распылительных сушильно-прокалочных аппаратов характерно высокое влагонапряжение рабочего объема – 200-513 кг/м<sup>3</sup>ч, в сравнении с влагонапряжением башенных конвективных распылительных сушилок – 10-20 кг/м<sup>3</sup>ч.

Предложен комплексный безразмерный параметр, число  $K_n$  для оценки переноса тепла излучением из высокотемпературной зоны перегрева в факельную зону испарения.

$$K_n = \left(\frac{T_{ст.н.з.}}{T_{ст.в.з.}}\right)^4 \left(\frac{T_{ст.н.з.}}{T_{пг.в.з.}}\right)^4, \quad (24)$$

Здесь  $T_{ст.н.з.}$ ,  $T_{ст.в.з.}$ ,  $T_{пг.в.з.}$  – соответственно, температура стенки камеры в нижней и верхней зонах и температура парогазовой среды на выходе из верхней зоны.

Введенный параметр является критерием оценки доли лучистого переноса в зону испарения из нижней высокотемпературной зоны. В зависимости от температуры стенок зон и парогазового потока в пределах значений, характерных для высокотемпературной



пературной сушки и прокали (рис. 10), доля тепла, передаваемого излучением из нижней зоны, в балансе верхней (факельной) зоны испарения может составлять от 0 до 53%, достигая максимального значения при  $K_T=3,5$ . Структура переноса подтверждена экспериментально балансами материального и теплового межзонального переноса.

При анализе эффективности использования тепла установлено, что в зависимости от условий процесса термический к.п.д. факельной зоны  $\eta_{т.ф}=59,6-79\%$ . Термический к.п.д. сушильно-прокалочной камеры с учетом полезных затрат тепла на нагрев среды до необходимых температур прокали достигает  $\eta_{т.с.п}=86,9\%$ .

Выявленные закономерности межзонального обмена материальными и тепловыми потоками и соотношения для определения кратности рециркуляции и времени пребывания нашли применение при разработке аналитической методики расчета высокотемпературных распылительных камер. Методика позволяет осуществлять масштабный переход к аппаратам других типоразмеров с теплопередачей от стенки, а также рассчитывать установки с применением распылительных сушильно-прокалочных аппаратов при использовании в качестве источника тепла горючего газа, сжигаемого при осуществлении процесса высокотемпературной распылительной сушки.

#### 4. Параметрические условия ресурсосбережения

В настоящей работе проведены системные исследования по установлению количественных зависимостей влияния параметров распылительной сушки на энергетические затраты.

На действующих установках распылительной сушки из-за попадания из сушильной камеры в пневмотрассу отработанного влажного сушильного воздуха происходит увлажнение продукта. Поэтому для получения стандартной влажности продукт приходится пересушивать, поддерживая на выходе из камеры повышенную температуру воздуха, что приводит к снижению производительности и повышению удельных затрат тепла. Экспериментально установлено, что увлажнение продукта на промышленной установке РСУ-1000 составляет  $\sim 0,5\%$ , что по расчету соответствует попаданию из сушилки в пневмотрассу отработанного влажного воздуха в количестве не менее 16% от расхода транспортирующего воздуха. Для устранения этого явления предложено использовать защищенное авторским свидетельством разгрузочное устройство.

Расчетами показана возможность снижения энергозатрат при подсушке продукта холодным воздухом на второй стадии после распылительной сушки за счет использования потенциала влагоемкости воздуха, составляющего 2-5 г/кг а.с.в после предварительной его осушки в результате охлаждения в интервале от  $0^\circ$  до минус  $14^\circ\text{C}$ . Применение более низких температур в соответствии с i-d диаграммой экономически нецелесообразно.

Разработана методика выбора предельно высокой достижимой производительности по испаренной влаге в сушильной камере за счет применения предельно высоких значений начальной температуры и расхода сушильного воздуха. Переход на максимальный расход воздуха достигается при сохранении расчетного времени пребывания в действующей сушильной камере за счет применения других значений размеров воздухораспределительного аппарата и начальной скорости струи теплоносителя, которые рассчитываются по зависимостям, установленным при исследованиях аэродинамики распылительных камер (10,16).

Переход на режим с максимальной температурой сушильного воздуха осуществляют следующим образом. Определяют относительную влажность и температуру воздуха на выходе из камеры  $\varphi_{вл}$  и  $t_{вых}$  из предварительно экспериментально полученного уравнения типа (25) равновесного состояния воздуха и данного вида продукта в процессе сушки. При этом исходят из условия, что текущая влажность его на выходе из камеры  $B$  не достигает равновесной. Это учитывается коэффициентом достижимости влажности продукта  $k_p < 1$  (тогда  $B_p = k_p B$ ).

$$\lg B = A\varphi_{вл} + \lg (C + D t_{вых}). \quad (25)$$

Здесь  $A, C, D$  – экспериментальные коэффициенты.

Затем рассчитывают предельно высокую производительность по испаренной влаге по изменению влагосодержания сушильного воздуха от начального значения до значения, соответствующего  $\varphi_{вл}$  и  $t_{вых}$ . По линии постоянного теплосодержания i-d диаграммы находят предельно высокую начальную температуру сушильного воздуха  $t_{вх}$ .

Предложенная методика рассмотрена на примере использования известной функциональной зависимости С.В. Паращука, М.М. Казанского и др. по кинетике сушки молочных продуктов (26), в которую вместо  $B_p$  подставляют  $B$ . Значения фактической и равновесной влажности продукта для сушильной камеры РСУ-1000 связаны эмпирическим соотношением  $B_p = 0,85B$  при  $k_p = 0,85$ .

$$\lg B_p = 0,01445 \varphi_{в} + \lg (1,423 + 0,0543 t_{вых}) \quad (26)$$

Установлена возможность перехода промышленной установки РСУ-1000 на двухстадийный процесс с предельно высокими значениями начальной температуры сушильного воздуха  $265-295^\circ\text{C}$  и его расхода  $86525 \text{ кг/ч}$  с влажностью продукта  $B=8,2\%$  после первой стадии распылительной сушки, при которой он сохраняет сыпучесть.

В этом случае производительность установки при той же распылительной камере может быть увеличена в 5-7 раз. Однако это потребует разработки принципиально новых устройств для распыливания значительно больших количеств жидкости, подачи теплоносителя и очистки сушильного воздуха от дисперсного продукта.

При работе над диссертацией была подтверждена эмпирическая зависимость Яна Писецки (27), связывающая изменения концентрации сухого вещества в исходном растворе  $\Delta S$ , влажности продукта  $\Delta M$ , и температур сушильного воздуха на входе  $\Delta t_{вх}$  и выходе  $\Delta t_{вых}$  из сушилки. Константа  $K=5$  для сухих молочных продуктов.

$$\Delta t_{вых} = \frac{\Delta t_{вх}}{10} + \Delta S - K \Delta M. \quad (27)$$

Согласно зависимости (27) каждое увеличение содержания сухого вещества на 1% в исходном растворе должно компенсироваться повышением температуры сушильного воздуха на выходе из камеры на  $1^\circ\text{C}$ . Повышение влажности порошка на 1% можно достичь, уменьшая температуру воздуха на выходе из камеры на  $5^\circ\text{C}$  или же повышая его температуру на входе на  $50^\circ\text{C}$  при постоянной температуре на выходе. Причем, температуру воздуха на выходе из камеры поддерживают, регулируя расход исходного раствора (производительность камеры по испаренной влаге).

Применение этой зависимости позволило оценить показатели действующих в промышленности установок в широком диапазоне изменений параметров одно- и двухстадийного процессов.

Для системной оценки роли параметров и стадийности процесса введен крите-



рий эффективности распылительной сушки  $K_{p.c.}$  (28) в виде произведения двух определяющих факторов – температурного потенциала сушильного воздуха и степени подсушки продукта на второй стадии, поскольку они однонаправленно влияют на производительность и эффективность использования энергозатрат на установке.

$$K_{p.c.} = \frac{t_{вх} - t_{вых}}{t_{вых}} \cdot \frac{B_{кн.км}}{B_{кн.у}} \quad (28)$$

Зависимости показателей ресурсосбережения от условий подсушки продукта на второй стадии приведены на рис. 13-16.

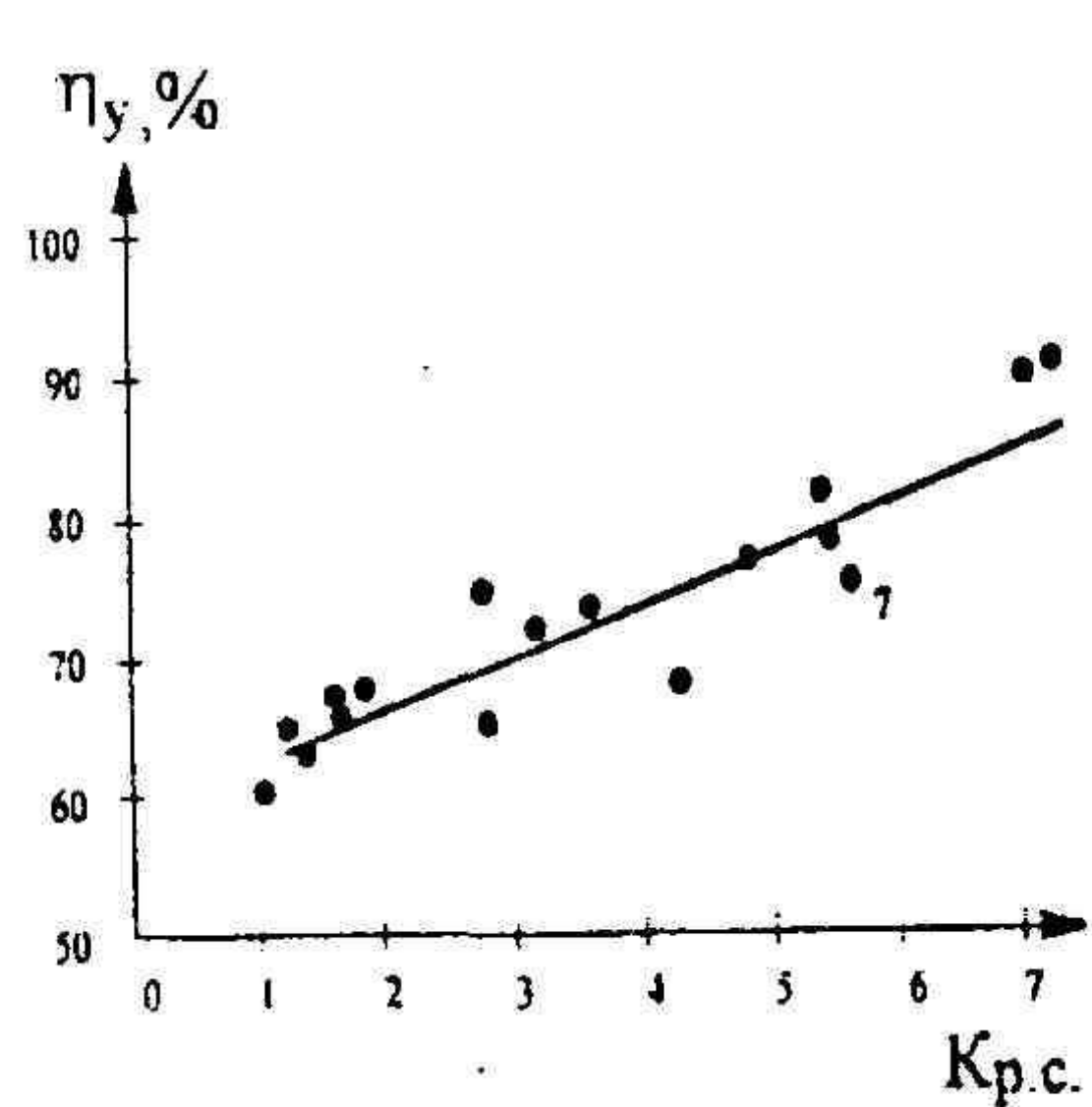


Рис. 13. Влияние  $K_{p.c.}$  на термический к.п.д. установки  $\eta_y$  (без учета потерь тепла перед воздухораспределительным устройством сушильной камеры)

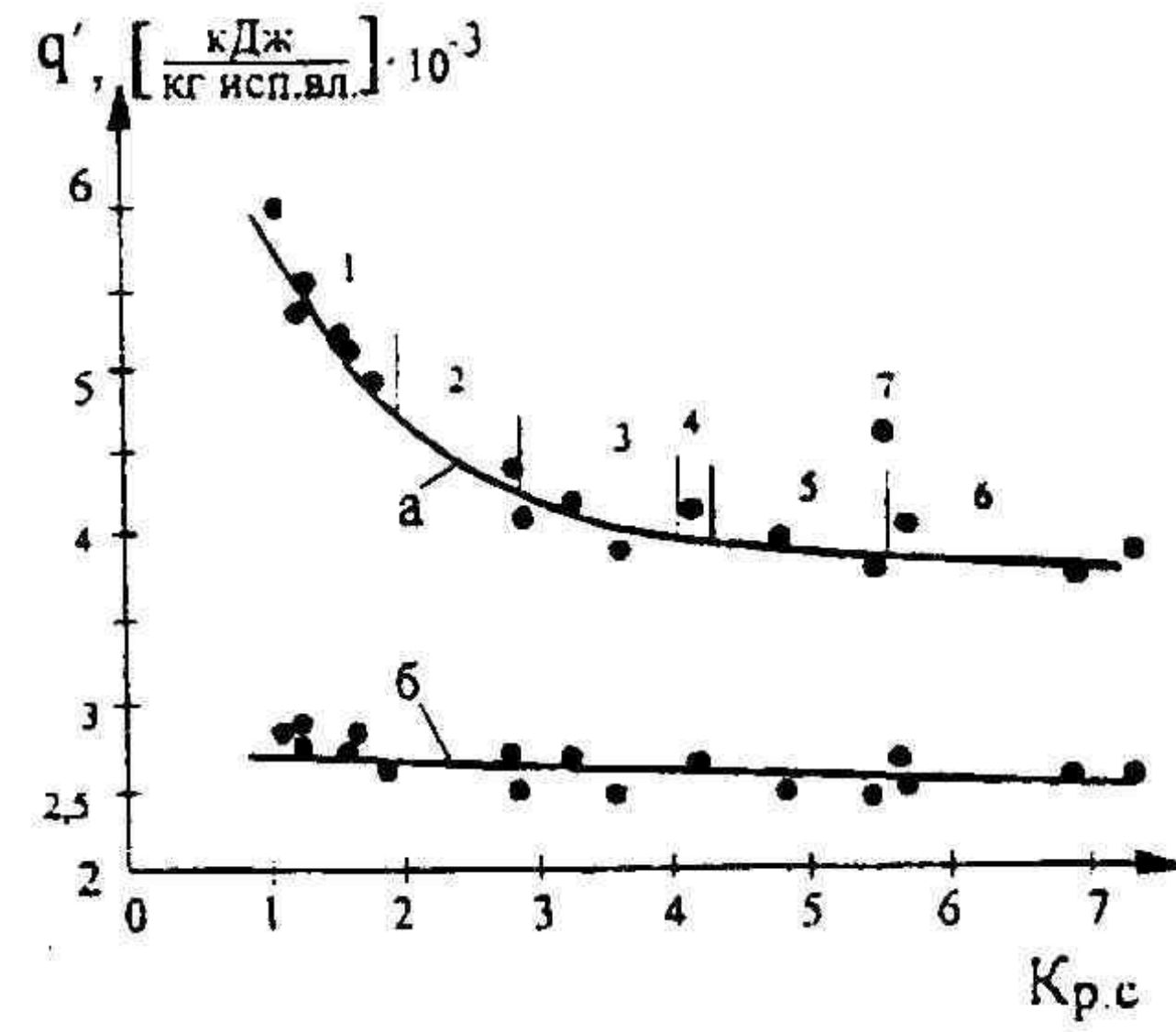


Рис. 14. Влияние  $K_{p.c.}$  на удельные затраты тепла  $q'$ : на установке – а, на процесс в камере – б

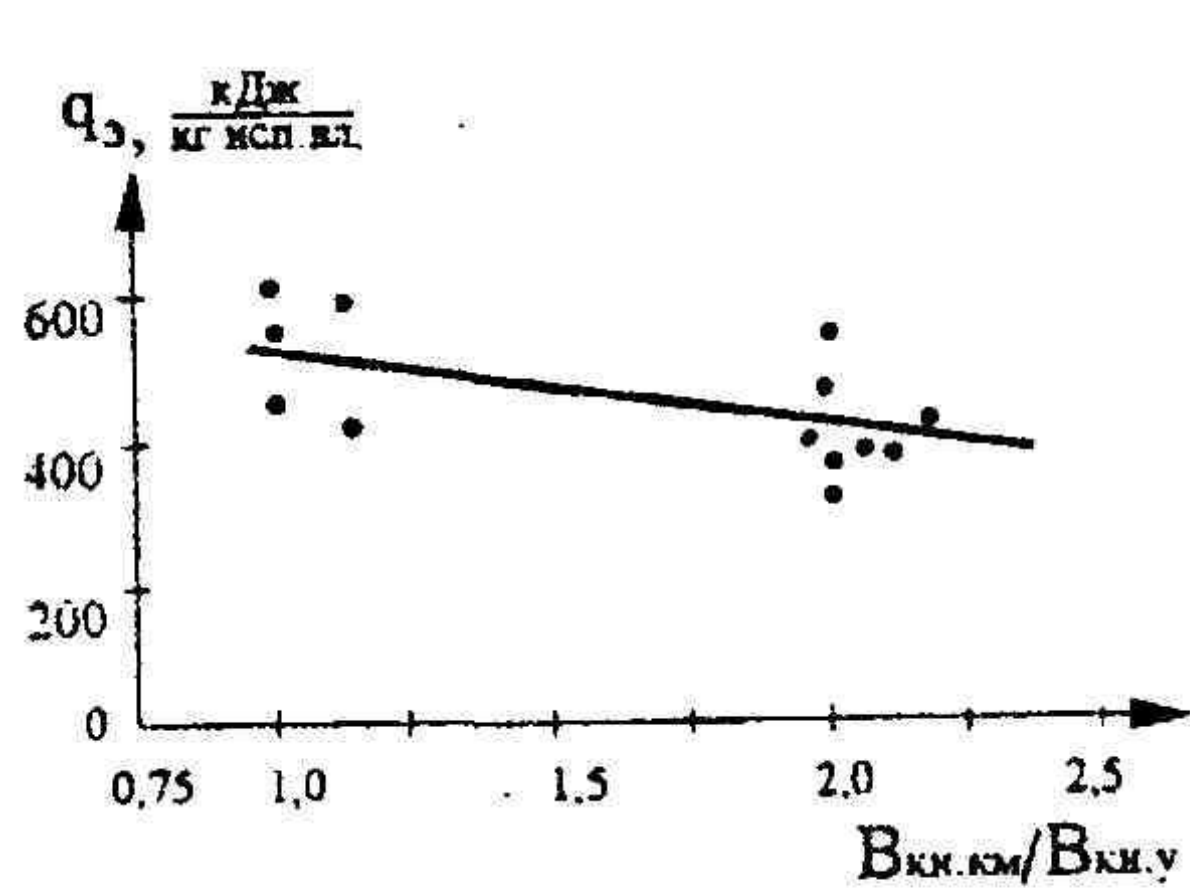


Рис. 15. Зависимость удельных затрат электроэнергии от степени подсушки продукта на второй стадии  $q_{э}$

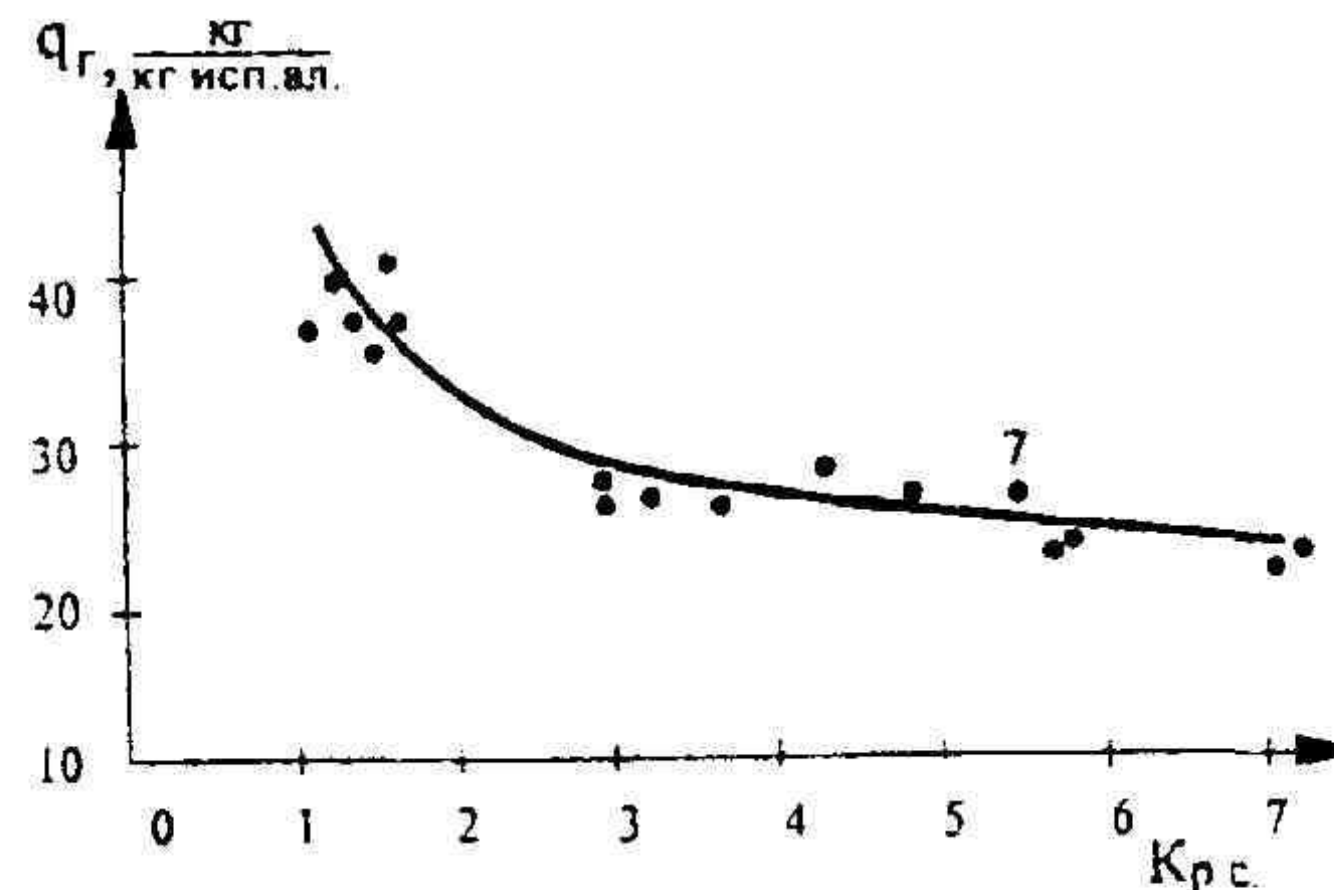


Рис. 16. Влияние критерия эффективности распылительной сушки на удельный расход сушильного воздуха  $q_{г}$

Условные обозначения к рисункам 13-16 (по областям изменения  $K_{p.c.}$ ): 1 – одностадийный процесс  $t_1 = 155-177^\circ\text{C}$ , без подсушки продуктов в пневмотрассе (п.т.); 2 –  $t_{1,1} = 155^\circ\text{C}$ ,  $t_{1,2} = 100^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_{1,1} = 155^\circ\text{C}$ , дополнительная подсушка в п.т. на 0,5-1,0% холодным воздухом (х.в.); 4 –  $t_{1,1} = 220^\circ\text{C}$ ,  $t_{1,2} = 100^\circ\text{C}$ ; 5 –  $t_{1,1} = 220^\circ\text{C}$ ,  $t_{1,2} = 100^\circ\text{C}$ , дополнительная подсушка х.в. на 0,5-1,0% в п.т.; 6 –  $t_{1,1} = 249; 265; 295^\circ\text{C}$ , вторая стадия сушки глубоко осушенным воздухом; 7 –  $t_{1,1} = 249^\circ\text{C}$ ,  $t_{1,2} = 100^\circ\text{C}$ .  
 $t_{1,1}$  – температура первой стадии;  $t_{1,2}$  – температура второй стадии

Расчетами установлено, что при предельно высоких начальных температурах сушильного воздуха на первой стадии и использовании на второй стадии глубоко осушенного воздуха с его подогревом за счет утилизации части тепла отработанного воздуха первой стадии сушки, термический к.п.д. установки возрастет до 91%. При этом частично увеличение к.п.д. может быть достигнуто при подсушке продукта на 0,5-1,0% на второй стадии в существующих на установках пневмотрассах. В максимальной степени к.п.д. возрастет при подсушке продукта на 3-5% в тепломассообменном виброаппарате, в котором время пребывания может быть увеличено в несколько раз. В результате удельный расход сушильного воздуха в распылительной камере может быть уменьшен до 22-26 кг/кг от значений 28-42 кг/кг, применяемых на действующих промышленных установках. При этом значительно снизятся энергетические затраты и потери продукта в виде пылеуноса.

В результате при проектировании и внедрении отечественных установок для сушки молочных продуктов были приняты эффективные энерго-ресурсосберегающие инженерные решения. Одностадийная отечественная установка РСУ-1000, одним из основных разработчиков которой является автор диссертации, имеет лучшие показатели в своем классе оборудования, наряду с аналогом – установкой фирмы «Ниро-Атомайзер».

Установлено, что эффективной мерой снижения затрат тепла при высокотемпературном процессе с применением распылительных сушильно-прокалочных аппаратов является использование тепла отработанного парогазового потока для предварительного концентрирования исходного раствора, в результате чего термический к.п.д. установки может быть увеличен до 67 – 81%.

### 5. Выбор рациональной структуры ресурсозатратных технологических установок

Разработана концепция, принципы построения и применения системы синтеза рациональных технических решений (СРТР) сложных технологических установок. Эффективность использования энергетических и материальных ресурсов на таких установках зависит от совокупности технических решений, принимаемых при разработке основных и вспомогательных аппаратов и систем.

Система предусматривает наиболее полное применение современной научно-технической информации и расчетных методик. В качестве критериев выбора рационального технического решения используются ресурсосберегающие и экологические показатели: термический к.п.д., удельные затраты энергии и выбросы продукта и др.

За аналог СРТР принята система структурного анализа, применяемая А.И. Половинкиным и А.М. Дворянкиным для решения изобретательских задач.

В диссертации предложено множество технических решений (ТР) сложных технологических одного класса (установки распылительной сушки, кипящего слоя, выпарные установки и др.) описывать в виде обобщающей функциональной структурной схемы (рис.17) и группы функционально взаимосвязанных аппаративно-конструктивных иерархических структур – деревьев: основного (рис.18) и вспомогательного аппаратов и систем, которые сосуществуют в своеобразном "симбиозе". Аппаратура класса установок распылительной сушки и прокалки представлена пятью деревьями. Предложено также каждое дерево описывать в виде структурной формулы. Формулы (29), (30) соответствуют структурным схемам (рис.17 и рис.18).

В описаниях технических решений автор диссертации использует три типа признаков (элементов): определяющие (●), которые всегда имеются на том или другом уровне структуры, альтернативные (○) признаки и признаки детализации (×). Признаки характеризуют функциональность, расположение элемента в структуре объекта или конструктивное исполнение.



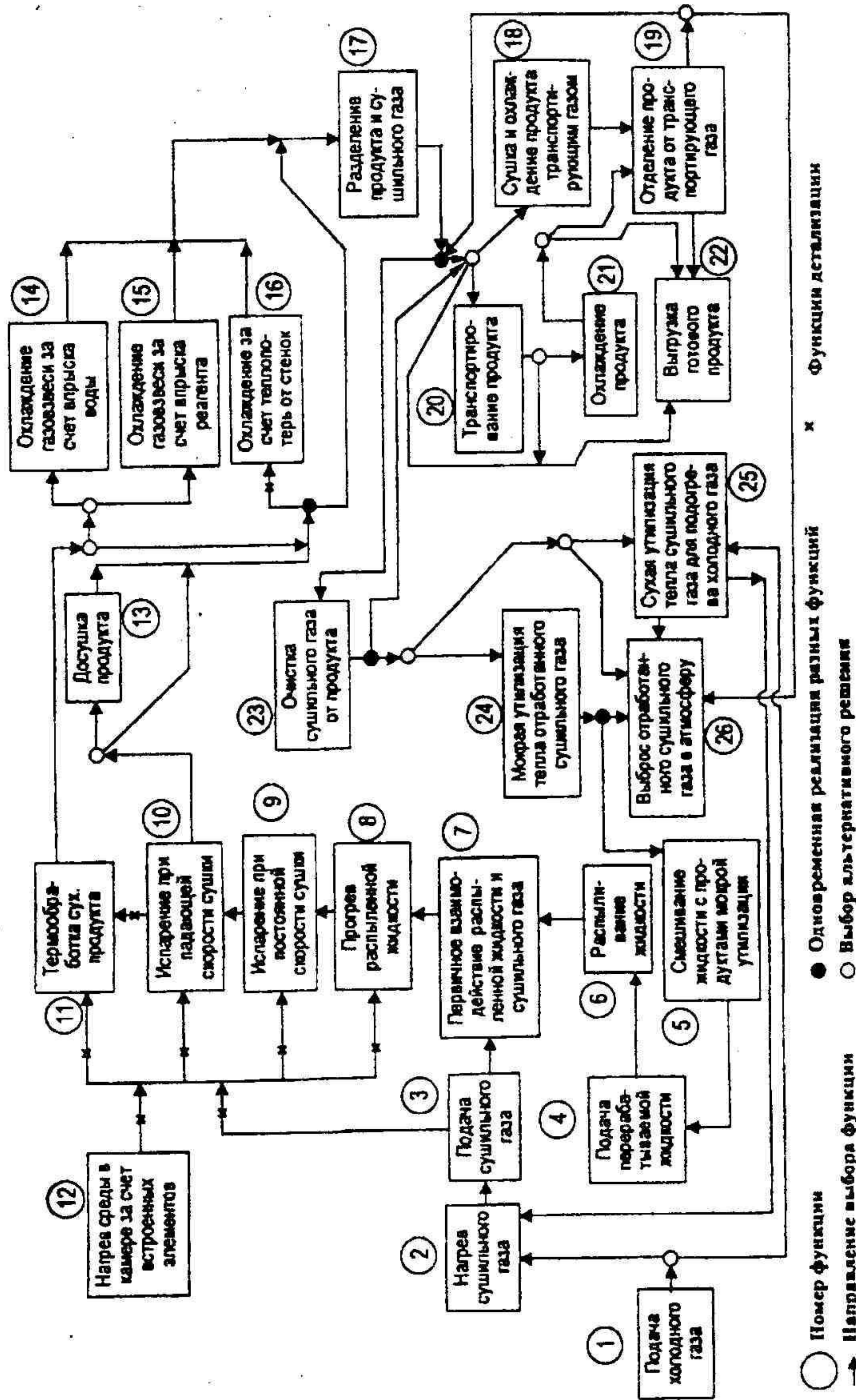


рис. 17. Структурная схема функциональных признаков признаков класса установок распылительной сушки и прокатки

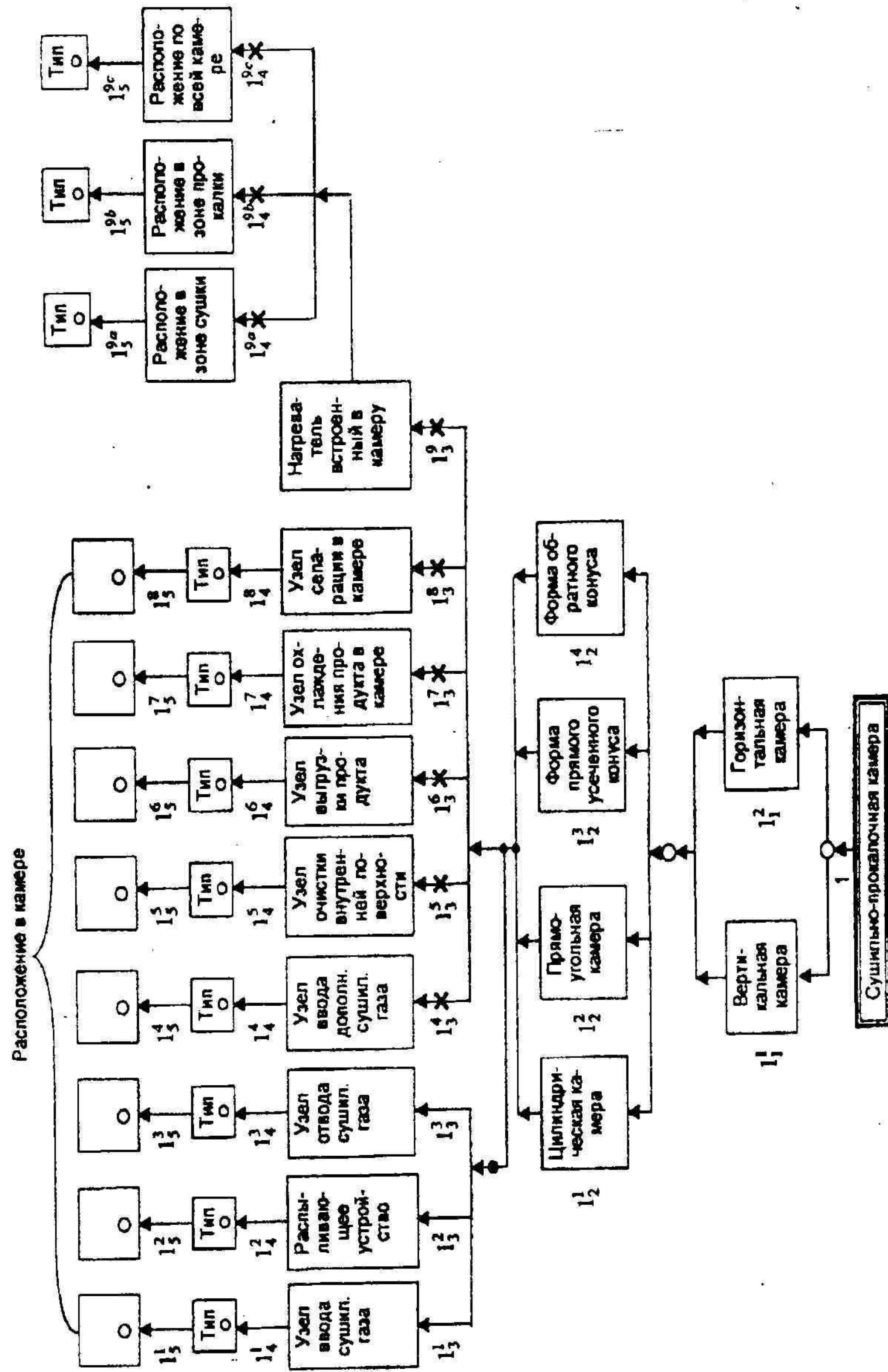


рис. 18. Структура конструкций камер для распылительной сушки и прокатки



$$(1) \circ (2) \circ (25, 2) \circ (3, 7, 8, 9, 10) \circ (12) [\times (8), (9), (10), (11)] [\alpha (14, 17), (15, 17), (16, 17), (17), (13, 17)] \bullet (17, 23) [\alpha (24, 5, 4, 26), (26), (25, 26, 2), (20, 22), (20, 21, 22), (20, 21, 19, 22, 26), (18, 19, 22, 26), (18, 19, 23), (18, 19, 20), (18, 19)]. \quad (29)$$

$$(1) \circ [(1_1^1), (1_1^2)] \circ [(1_2^1), (1_2^2), (1_2^3), (1_2^4)] \bullet [(1_3^1, 1_4^1, 1_5^1), (1_3^2, 1_4^2, 1_5^2), (1_3^3, 1_4^3, 1_5^3)] \times [(1_3^4, 1_4^4, 1_5^4), (1_3^5, 1_4^5, 1_5^5), (1_3^6, 1_4^6, 1_5^6), (1_3^7, 1_4^7, 1_5^7), (1_3^8, 1_4^8, 1_5^8)] \times (1_3^9) \times \{[(1_4^{9a}), (1_5^{9a})], [(1_4^{9b}), (1_5^{9b})], [(1_4^{9c}), (1_5^{9c})]\}. \quad (30)$$

Рациональное техническое решение (РТР) технологической установки выбирают из конечного множества возможных вариантов как совокупность определенных скелетных ветвей по одной от каждого дерева. Каждая ветвь состоит из определенного сочетания технических признаков. Такая совокупность ветвей обеспечивает заданные характеристики оборудования и лучшие показатели интенсивности теплообменных процессов и ресурсосбережения.

На основе анализа структурных образований автором сформулированы теорема и следствие и предложены формулы для расчета множества возможных решений по каждому аппарату и системе в составе установки (31) и для установки в целом.

**Теорема.** Множество вариантов структурного иерархического образования равно произведению альтернативных признаков и сумм сочетаний каждого уровня структуры из числа элементов, в которое входят число группы определяющих признаков и число признаков детализации.

$$N_c = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \dots a_i \sum_{e_1=1}^{e_1=d_1} C_{(b_1+d_1)-e_1}^{(b_1+d_1)} \cdot \sum_{e_2=1}^{e_2=d_2} C_{(b_2+d_2)-e_2}^{(b_2+d_2)} \cdot \dots \cdot \sum_{e_i=1}^{e_i=d_i} C_{(b_i+d_i)-e_i}^{(b_i+d_i)}, \quad (31)$$

где  $C$  – математическая процедура определения числа сочетаний;  $a_1, a_2, \dots, a_i$  – числа альтернативных признаков соответствующих уровней (могут принимать значения чисел натурального ряда); при отсутствии альтернативы  $a_i = 1$ ;  $b_1, b_2, \dots, b_i$  – число групп определяющих признаков; на любом уровне  $b_i$  может принимать одно из двух значений – «0» или «1»; группа образуется из любого числа определяющих, обязательных для этого уровня признаков;  $d_1, d_2, \dots, d_i$  – число признаков детализации;  $e_1, e_2, \dots, e_i$  – параметр, определяющий число признаков  $[(b_i + d_i) - e_i]$ , из которых получается соответствующее сочетание (принимает последовательно значения чисел натурального ряда); выполняется условие  $[(b_i + d_i) - e_i] \geq 1$ ;  $d_i$  – принимает значения «0» и чисел натурального ряда.

**Следствие.** Множество вариантов конструктивных и аппаратурных технических решений комплексной технологической установки ( $N_{TY}$ ) равно произведению множеств иерархических древовидных структур ( $N_{C1}, N_{C2}, \dots, N_{Cn}$ ), группа которых совместно описывает заданный класс технологического оборудования

$$N_{TY} = N_{C1} \cdot N_{C2} \cdot \dots \cdot N_{Cn}. \quad (32)$$

$N_{C1}, N_{C2}, \dots, N_{Cn}$  – множества древовидных структур аппаратов и систем в составе установки.

Расчетами установлено, что сумма множества ТР класса установок распылительной сушки, которые отличаются хотя бы одним конструктивным или функциональным признаком, составляет  $\sim 7,5 \cdot 10^7$ .

Разработана блок-схема алгоритма выбора рациональных технических решений (РТР), которая состоит из расчетно-аналитических этапов и процедур. Для ис-

пользования автоматизированной системы выбора РТР необходимо создание расчетных и ведущей программ и программы анализа расчетных результатов на ЭВМ с участием оператора в диалоговом режиме.

Результаты структурного анализа использованы автором при выборе РТР оборудования для сушки молока и получения дисперсных оксидов металлов в классе распылительных сушильных и сушильно-прокалочных установок.

Научные основы системы выбора РТР универсальны и могут быть использованы при выборе РТР в конкурирующих классах теплообменных установок и при модернизации оборудования.

## 6. Экспериментальные исследования, промышленные испытания и внедрения

Разработаны методики и экспериментальные установки, исследованы характеристики газодисперсного факела и аэродинамики камер распылительной сушки. Предложены и отработаны ресурсосберегающие технологические и конструкторские решения промышленных установок. Они позволяют устранить подсосы влажного воздуха в пневмотрассы, организовать стабильную выгрузку продукта из сушильной камеры, повысить коэффициент газоочистки, используя суммарный сепарационный эффект сушки как осадительной камеры, центробежного устройства на ее выходе и циклона в аппаратурно-технологической схеме установки. Коэффициент сухой газоочистки составляет не менее 99,6%, в то время как на действующих в промышленности установках он, как правило, не выше 97,5 %.

Защищены авторскими свидетельствами использованные ресурсосберегающие технические решения: узел отвода газов из сушильной камеры, разгрузочное устройство для сыпучих материалов и устройство для мокрой очистки и утилизации тепла отработанного сушильного воздуха.

Предложена методика диагностики паровых калориферов в процессе эксплуатации, применение которой обеспечивает своевременное выявление течей в теплообменных трубках, позволяет устранить потери греющего пара, значительно поднять производительность установок сушки и снизить затраты тепла.

Перечисленные выше технические решения использованы при разработке и внедрении промышленных установок серии РСУ-1000.

Внедрено 12 промышленных установок с производительностью  $\approx 1000$  кг/ч по продукту каждая для сушки цельного и обезжиренного молока, заменителей цельного молока и молочного белка (казеината натрия) на 6-ти вновь построенных молочноконсервных комбинатах на территории СНГ.

Эти установки являются основным оборудованием молочноконсервных комбинатов в городах Степногорск (Казахстан), Калинковичи (Белоруссия), Миллерово, Белгород, Калининград и Советск (Россия).

На основе расчетов и конструкторских проработок выполнен проект реконструкции действующих установок сушки с двукратным увеличением производительности за счет повышения расхода сушильного воздуха, предложена оптимальная аппаратурно-технологическая схема сухой очистки отработанного воздуха с коэффициентом очистки до 99,9 %.

Предложены компоновочные решения установок конвективной распылительной сушки, применение которых позволит существенно снизить потери тепла на действующих предприятиях.



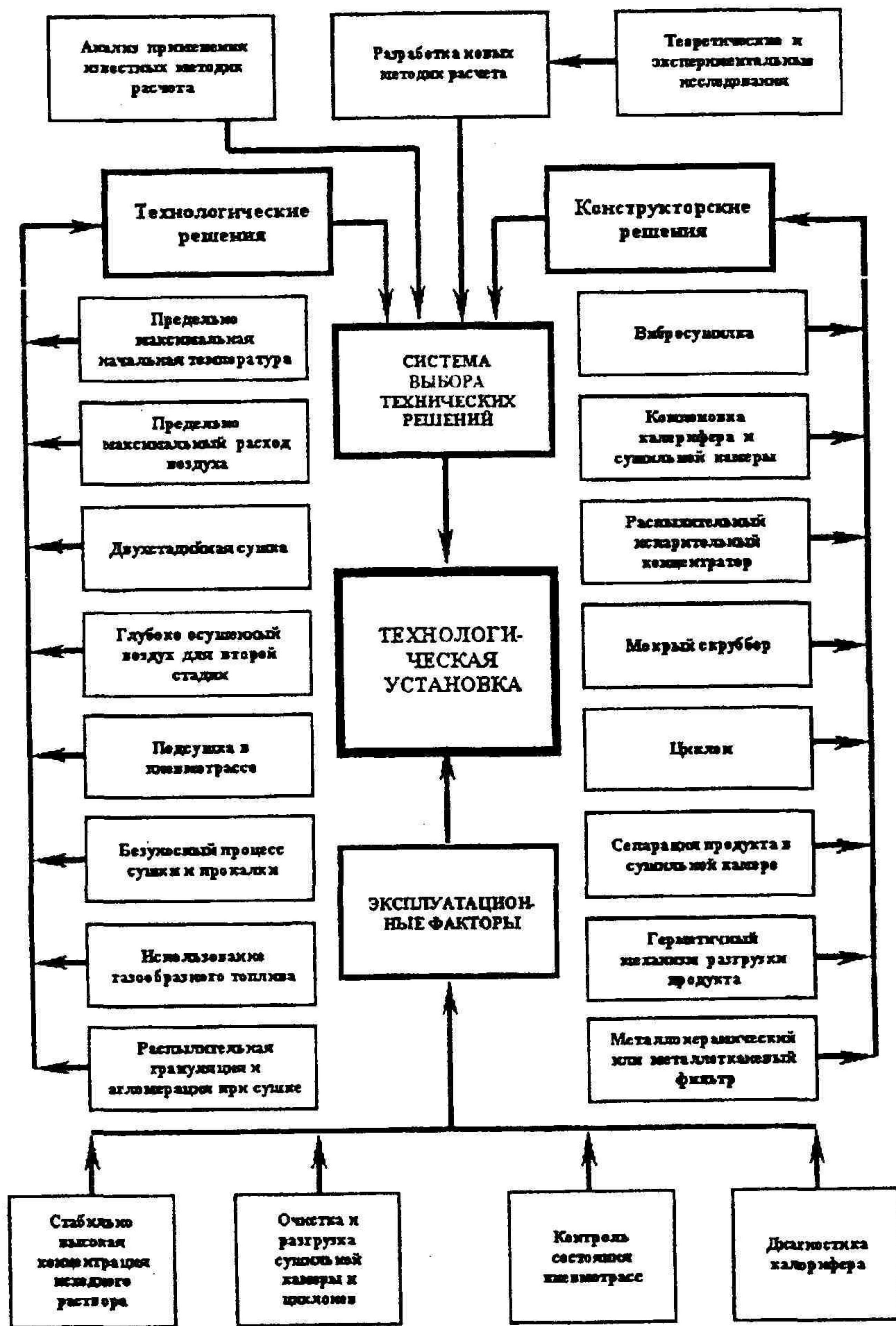


Рис. 19. Факторы рациональной организации распылительной сушки

Внедрения оборудования с применением новых ресурсосберегающих технических решений позволили получить значительный технико-экономический эффект.

Проведена серия успешных технологических испытаний сушильно-прокалочных распылительных установок с аппаратами типа «Луч» разных типов-размеров при термической утилизации жидких отходов разных типов, получении оксидов из пульп и растворов и грануляции аэрозольных порошков. В процессе выполнения диссертационной работы внедрена распылительная сушильно-прокалочная установка для получения оксидов редкоземельных металлов на заводе ГИРЕДМЕТ (г. Верхняя Пышма).

Другая установка для переработки радиоактивных высокотоксичных отходов, разработанная по техническому заданию автора диссертации, после отработки технических решений была подготовлена к промышленным испытаниям. Составлены технические предложения для разработки сушильно-прокалочной установки «ЭРА», в которой используется теплота сжигания горючих газов. По проектным технико-экономическим характеристикам она превосходит известные установки аналогичного назначения.

Предложена схема взаимосвязи факторов рациональной организации установок, рекомендуемая при выборе энерго-ресурсосберегающих процессов и оборудования для получения сухих дисперсных продуктов методами распылительной сушки и прокалки (рис.19).

В приложениях к диссертации представлены оригинальные методики экспериментальных исследований, описана приборная база, дана оценка точности измерений и обработки экспериментальных данных. Приведены технико-экономические показатели рабочих и расчетных режимов установок распылительной сушки, параметры технологических процессов с применением предложенных в диссертации технических решений, акты внедрений по теме диссертации.

### ВЫВОДЫ

1. В результате анализа современного состояния научно-технических разработок в области распылительной сушки установлены ограничения существующих методик расчета и значимость технологических, конструкторских и эксплуатационных факторов интенсификации теплообмена и повышения эффективности ресурсосбережения. Определена необходимость в теоретических и экспериментальных исследованиях малоизученных сторон аэродинамики и теплообмена при истечении газовых и газодисперсных струй в распылительных камерах и в проведении опытно-конструкторских работ. Важным условием ресурсосбережения является применение системы выбора рациональной аппаратно-параметрической структуры установок распылительной сушки и параметрических условий ресурсосбережения при эксплуатации.

2. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что газовая струя является основным источником циркуляции в камере. Это позволило получить зависимости для расчета расхода факела и времени пребывания газовой ячейки и частиц продукта в распылительных камерах. Расчет энергии движения потоков газа в струйной камере с использованием экспериментальных данных позволил установить характер рециркуляции и механизма межзонального переноса тепла и массы и определить соотношение лучистой и конвективной составляющих. Теоретически обоснована возможность создания безциркуляционной камеры за счет заданного закона распределения расхода потока газа.

Экспериментальные и теоретические исследования характеристик газодисперс-



ного факела подтвердили высокую интенсивность межфазных процессов тепломассообмена в факельной зоне активного испарения и наличие большого резерва для повышения производительности. Подтверждено расчетами, что производительность в зоне по испаренной влаге может быть увеличена в 5-7. Определены инженерные задачи, которые нужно решить для обеспечения такого роста. Установлены технологические и конструктивные факторы управления кратностью циркуляции, временем пребывания, интенсивностью тепломассообменных процессов, эффективностью использования тепла, а также факторы влияния на агломерацию продукта и его потери. Исследования доведены до расчетных формул и аналитических методик расчета распылительной сушки.

3: Экспериментально исследован тепломассообмен в цилиндрической камере с высокотемпературными стенками, измерены температурные поля, определены границы испарения факела, рассчитаны значения коэффициентов теплоотдачи от стенок аппарата к содержащейся в нем среде. Для обобщения результатов выполнено теоретическое исследование. Среда рассмотрена как поглощающая тепло с отрицательными источниками тепла в виде испаряющихся капель. С помощью теории подобия дифференциальное уравнение конвективного теплообмена в цилиндрической камере трансформировано в функциональную систему безразмерных чисел подобия, отражающих газодисперсный характер среды, температурные условия и параметры истечения струи. Получены зависимости для расчета длины зон испарения и перегрева среды и температур на их границах. Зависимости нашли применение в разработанной методике расчета распылительного сушильно-прокалочного аппарата с теплоподводом от высокотемпературных стенок.

4. Предложена система показателей оценки эффективности использования тепла и продукта на установках. Введен показатель эффективности распылительной сушки, который позволяет определять область значений параметров процесса, соответствующих минимальным затратам тепла, электроэнергии и потерям продукта. Для основных типов промышленных установок распылительной сушки выполнен анализ влияния температур процесса и соотношения влажности продукта между стадиями сушки в двухстадийном процессе на эффективность использования ресурсов. Разработана методика выбора предельных значений производительности, начальных температур и расхода сушильного воздуха на основе применения кинетической кривой сушки с использованием зависимостей теории турбулентных струй. На основе анализа установлено, что наиболее экономичен 2-х стадийный процесс распылительной сушки с предельно высокими значениями начальной температурой и расхода сушильного воздуха и использованием на второй стадии в качестве сушильного агента воздуха, предварительно глубоко осушенного вымораживанием.

5. В настоящее время выбор аппаратно-технологических схем установок распылительной сушки происходит из ограниченного числа возможных вариантов. Поэтому находящиеся в эксплуатации и проектируемые установки не могут быть признаны достаточно совершенными.

С целью повышения их эффективности по показателям энергоресурсосбережения разработана система синтеза рациональных технических решений (СРТР) сложных технологических установок на основе наиболее полного применения современной научно-технической информации и сопоставления показателей возможных вариантов исполнения основного и вспомогательного аппаратов и

систем обеспечения, входящих в состав установки. Их представляют в виде графических многоуровневых структур (деревьев), состоящих из определяющих (обязательных) признаков, альтернативных признаков и признаков детализации. Класс оборудования описывается обобщающей функциональной структурной схемой. Предложено также описывать функциональные части оборудования в виде компактных структурных формул. Разработана блок-схема алгоритма выбора РТР, содержание его этапов и процедур. Сформулированы теорема и следствие к ней, которые позволяют определять мощность множества технических решений и объем вычислений на каждом этапе усечения графических структур. В качестве критериев выбора предложено применять показатели эффективности использования на установке тепловых и материальных ресурсов. В информационных блоках методического обеспечения алгоритма содержатся известные методики расчета, методики, полученные при выполнении диссертации, а также технологические, конструкторские, аппаратные решения и перечень эксплуатационных мер, ресурсосберегающая эффективность которых подтверждена расчетами и результатами экспериментов. Принципиальные положения СРТР нашли применение при разработке промышленных распылительных установок для получения сухих молочных продуктов и оксидов солей металлов. Для масштабного внедрения СРТР и повышения достоверности выбора необходимо выполнить большой объем работ по системному анализу информации и разработке программного обеспечения.

6. Проведены серии технологических исследований на экспериментальных и промышленных установках, в результате которых отработаны технологические, аппаратные, конструкторские и эксплуатационные решения, повышающие надежность оборудования и способствующие снижению энергетических затрат и потерь продукта. К ним относятся: устранение подсосов отработанного воздуха из сушильной камеры в пневмотрассы, диагностика калориферов в процессе эксплуатации для обнаружения течей в теплообменных трубках, применение мокрого скруббера, использование сепарационного эффекта сушильной камеры в сочетании с центробежным устройством на выходе из нее и циклоном на последующей стадии очистки. Разработаны конструктивные и эксплуатационные меры, обеспечивающие равномерную эвакуацию продукта из аппаратов установки, которые устраняют потери продукта в результате залповых выбросов. Показано, что грануляция и агломерация продукта при сушке повышают эффективность газоочистного оборудования.

Значительная экономия тепла и продуктов может быть получена благодаря широкому использованию распылительных струйных аппаратов с теплоподводом от стенок и при сжигании газа. Показано, что такие установки по своим технико-экономическим показателям превосходят известные аналоги.

Разработанные в результате теоретических и экспериментальных исследований комплекс методик расчета и схема рациональной многофакторной организации установок распылительной сушки способствуют решению проблемы повышения эффективности использования энергоресурсов.

#### Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И., Добрыгин П.Г., Янкин Т.Д., Сергеев Г.А., Долгов В.В. Отверждение жидких отходов в аппаратах распылительной сушки и в аппаратах с кипящим слоем // Научно-техническая конференция стран-членов СЭВ по проблеме «Иссле-



- дование в области обработки и захоронения радиоактивных отходов» (Дрезден, сентябрь 1967). – М.: Изд-во СЭВ, 1968. – С. 203-216.
2. Гамрекели М.Н., Захарова К.П., Куличенко В.В., Давыдов В.И. Распылительная сушка растворов // Тр. ин-та / Свердловский химический машиностроительный институт. – 1967. – Вып. 17, инв.№305011.
3. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И. Распылительная сушка растворов // Тр. ин-та / Свердловский химический машиностроительный институт. – 1967. – Вып. 20, инв.№3336И.
4. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И. Исследование теплопередачи при распылительной сушке растворов с теплоподводом от высокотемпературных стенок цилиндрического реактора // Атомная энергия. – 1968. – Т.24. – Вып.3. – С. 259-260.
5. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И. Распылительный реактор с лучисто-конвективным подводом тепла // Химическая промышленность. – 1969. – 11. – С. 860-861.
6. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И. // Исследование узкофакельной пневматической форсунки внутреннего смещения при подаче жидкости мембранным насосом-дозатором // Материалы второй научно-технической конференции УПИ, секция металлургического факультета. – Свердловск, 1968. – С. 46.
7. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И. Исследование скоростей факела распыленной жидкости // Материалы VIII Всесоюзной межвузовской конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. – Одесса, 1968. – С. 30-31.
8. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И. Исследование границ испарения факела распыленной жидкости в цилиндрическом реакторе с теплоподводом от высокотемпературных стенок // Доклад. Всесоюзное совещание по тепло-массообмену. Теплоперенос. – Киев: Наукова думка, 1968. – С. 294-303.
9. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И., Райков Ю.А., Ривкин М.Н. // Экспериментальное исследование возможности переработки пульпы в распылительном реакторе // Тр. предприятия п/я 222; Инв.№2742, сб.- 1966.
10. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И. Определение граничных температур и размеров испарительной зоны в аппарате распылительной сушки с теплоподводом от высокотемпературных стенок // Инженерно-физический журнал. – 1971. – Т. XX. – 5. – С. 773-781.
11. Гамрекели М.Н. Изучение теплообмена при высокотемпературной распылительной сушке в прямоточном аппарате с теплоподводом от стенок: Дисс канд. техн. наук. – Свердловск, 1970. – 156 с.; ВО43725, сб. реф. НИР, №19-20, серия 03, ВНИЦ, 1971.
12. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И., Долгов В.В. Инженерный метод расчета сушильно-прокалочного распылительного аппарата // IV Международный конгресс по химической технике, химическому машиностроению и автоматизации – ХИСА; (Прага, сентябрь 1972). Доклад К5-15 (Микрофильм).
13. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И., Долгов В.В., Муравьев Л.Л., Карпенко А.И. Методика обработки результатов исследований распылительного сушильно-прокалочного аппарата / ВНИЦентр. – Сб. рефератов НИР; серия 03, №23-24; Инв. Б168482. – М.- 1972.
14. Гамрекели М.Н., Алексеева О.А., Давыдов В.И., Гуменюк В.И., Голяков Л.И. Процессы термического разложения солей. Лит. обзор и библиография за 1962-1972 гг. / ВНИЦентр. – Сб. рефератов НИР и ОКР; Серия 03, №12, 1973.
15. Гамрекели М.Н. Установка «Луч» для распылительной сушки и прокалки растворов солей и суспензий. / ВИМИ. – Инв. 74-0565, 1974.
16. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И. Анализ прогрева и испарения одиночных капель жидкости в испарительной зоне распылительного сушильно-прокалочного аппарата // Материалы V научно-технической конференции УПИ, секция разработки химического оборудования. – Свердловск. – МВО и ССО РСФСР, дсп; Инв.7378.- 1976.
17. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И. Экспериментальное исследование дисперсности и концентрационных полей в цилиндрическом аппарате в условиях стесненности факела. Материалы V научно-технической конференции УПИ, секция разработки химического оборудования. – Свердловск, 1976. – МВО и ССО РСФСР, дсп; Инв.7378.
18. Гамрекели М.Н., Миронов В.С., Молотков В.П. Автоматизация прямоточного распылительного сушильно-прокалочного аппарата с прямым нагревом стенки. Материалы V научно-технической конференции УПИ, секция разработки химического оборудования –

Свердловск, 1976. – МВО и ССО РСФСР, дсп; Инв.7378.

19. Гамрекели М.Н., Давыдов В.И. Исследование устройств для предотвращения настылеобразования в сушилках типа «Луч»// Тр.ин-та / Свердловский химический машиностроительный институт; Инв.1806. – 1977.
20. Термические процессы и аппараты для получения окислов редких и радиоактивных материалов / В.И.Давыдов, М.Н.Гамрекели, П.Г.Добрыгин; под ред. В.И.Давыдова. – М.: Атомиздат, 1977. – 208 с.
21. Гамрекели М.Н., Шацлло В.Г., Долгов В.В., Белявский В.Н. и др. Оборудование для сушки молока и пути его совершенствования: ЭП «Молочноконсервная промышленность» / ЦНИИИНФОРМТЭИ. – М., 1980. – 6.
22. А.с.731945. МПК А23 С1/04, F26B25/00. Узел отвода газов из сушильной камеры / М.Н.Гамрекели, В.Д.Харитонов, В.А.Целищев (СССР). – 2612818/28-13. Заявлено 11.05.78; Опубл. 05.05.80. Бюл.17.
23. А.с.719677. МПК В01Д47/06. Устройство для мокрой очистки воздуха / Н.Н.Липатов, В.Д.Харитонов, В.М.Кузьмин, А.А.Толстовский, М.Н.Гамрекели, Г.А.Базин (СССР) – 2651359/23-23. Заявлено 26.07.78; Опубл. 15.03.80. Бюл.9.
24. Гамрекели М.Н., Белявский В.Н., Целищев В.А. и др. Установка для распылительной сушки сгущенных продуктов / Депонир. статья Д04776; Реферат МРС «ТТЭ»; Серия «Т», вып.28. п/я А-1420.- 1981.
25. Гамрекели М.Н., Базин Г.А., Плановский А.А., Кузьмин В.М. // Материалы Всесоюзной конференции «Дальнейшее совершенствование теории, техники и технологии сушки» (Чернигов, 10-12.06.1981г.). – М.: Изд-во КМС ВСНТО, 1981.
26. Гамрекели М.Н., Целищев В.А., Белявский В.Н. и др. Автоматизированная установка распылительной сушки жидких концентратов / ВИМИ. – 384 -1293.- 1984.
27. А.с. 1194786. МПК В65Д88/66. Разгрузочное устройство для сыпучих материалов / М.Н.Гамрекели, А.А.Толстовский, В.Г.Карпунин (СССР). – 3007408/28-13; заявлено 20.11.80; Опубл. 30.11.85. Бюл.44.
28. Гамрекели М.Н., Лазарев Л.Н., Алой А.С. и др. Разработка процессов включения радиоактивных отходов в керамические материалы и стеклометаллические композиции. Специальные вопросы атомной науки и техники. Серия «Радиохимия»: ГК СССР по использованию атомной энергии// Свердловский химический машиностроительный институт. Инв. 5288.- 1987.
29. Гамрекели М.Н. Применение системного структурно-морфологического анализа для оптимизации технических решений по экологическим и ресурсосберегающим критериям // Материалы VII Международного экологического симпозиума «Урал атомный. Урал промышленный». – Екатеринбург: Институт промышленной экологии УрО РАН, 1999. – С. 25-27.
30. Гамрекели М.Н. Установки «ЭРА» и «Луч» для термической переработки растворов и утилизации отходов // Материалы VII Международного экологического симпозиума «Урал атомный. Урал промышленный». – Екатеринбург: Институт промышленной экологии УрО РАН, 1999. – С. 27-30.
31. Гамрекели М.Н. Факторы влияния на ресурсосбережение и снижение выбросов в окружающую среду при распылительной сушке // Материалы VII Международного экологического симпозиума «Урал атомный. Урал промышленный». – Екатеринбург: Институт промышленной экологии УрО РАН, 1999. – С. 30-32.
32. Гамрекели М.Н. Эффективная очистка газовых выбросов и сточных вод при обезвоживании растворов и суспензий в высокотемпературных распылительных аппаратах. // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные проблемы промышленной экологии» (Орел, 17-19 ноября 1999г.). – Орел: Изд-во Орел ГТУ, 2000. – С. 66-68.
33. Гамрекели М.Н. Экологический и ресурсосберегающий аспекты стандартизации аппаратов распылительной сушки. // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные проблемы промышленной экологии» (Орел, 17-19 ноября 1999г.). – Орел: Изд-во Орел ГТУ, 2000. – С. 69-70.
34. Гамрекели М.Н. Перспективы использования установки «ЭРА» для термической



переработки маслосодержащих водных отходов. // *Материалы Международной научно-практической конференции «Современные проблемы промышленной экологии»* (Орел, 17-19 ноября 1999г). – Орел: Изд-во Орел ГТУ, 2000. – С. 71-73.

35. Гамрекели М.Н. Влияние вибрационных устройств на ресурсосбережение и снижение выбросов в окружающую среду при распылительной сушке // Доклад на научно-техническом семинаре «Виброакустические процессы в технологиях, оборудовании и сооружениях лесного комплекса» (Екатеринбург, 23-25 ноября 1999г.). – Екатеринбург: УГЛТА, 2000. – С. 37-40.

36. Гамрекели М.Н. Экономия энергии при двухстадийной распылительной сушке с досушкой холодным воздухом. // *Материалы Международной научно-технической конференции «Уралэкология-техноген-2000»* («Экологические проблемы промышленных регионов»). – Екатеринбург: Изд-во Дом «Урал-Принт», 2000. – С. 34.

37. Гамрекели М.Н. Технологические возможности по снижению загрязнения атмосферного воздуха установок для термической переработки токсичных жидких отходов. // *Материалы Международной научно-технической конференции «Уралэкология-техноген-2000»* («Экологические проблемы промышленных регионов»). – Екатеринбург: Изд-во Дом «Урал-Принт», 2000. – С. 202.

38. Гамрекели М.Н. Расчет размеров рекуперативной теплообменной камеры со стесненной газодисперсной струей для локального отвода тепловыделений // *Материалы 10-ой Всероссийской Научно-технической конференции «Теплофизика технологических процессов»* - Рыбинск: РГАТА, 2000. – Ч.2. – С. 64-65.

39. Гамрекели М.Н. Интенсивность теплообмена в активной зоне испарения камеры распылительной сушки. // *Материалы 10-ой Всероссийской Научно-технической конференции «Теплофизика технологических процессов»* - Рыбинск: РГАТА, 2000. – Ч.2. – С. 66-67.

40. Гамрекели М.Н. Струйное кондиционирование в реакционных объемах и поверхностных зонах с интенсивным теплогазовыделением. // *Материалы 10-ой Всероссийской Научно-технической конференции «Теплофизика технологических процессов»* - Рыбинск: РГАТА, 2000. – Ч.2. – С. 67-69.

41. Гамрекели М.Н. Внедрение системы синтеза оптимальных технических решений – стратегический путь в решении проблемы защиты биосферы от промышленных выбросах // *Материалы Всероссийского научного молодежного симпозиума «Безопасность биосферы-2000»* (Екатеринбург, 10-12 окт. 2000г.). – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. – С. 28-29.

42. Гамрекели М.Н. Использование сепарационного эффекта камер распылительной сушки для снижения воздействий на биосферу отработанного сушильного воздуха // *Материалы Всероссийского научного молодежного симпозиума «Безопасность биосферы-2000»* (Екатеринбург, 10-12 окт. 2000г.). – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. – С. 52.

43. Гамрекели М.Н. Выбор предельных значений производительности распылительной сушилки по испаренной влаге и начальных температур сушильного воздуха // *Материалы Международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса»*. – Екатеринбург: УГЛТА, 2001. – С. 100-101.

44. Гамрекели М.Н. Повышение производительности и снижение удельных энергозатрат установок распылительной сушки с досушкой продукта в пневмотрассе транспортирующим воздухом. // *Материалы Международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса»*. – Екатеринбург: УГЛТА, 2001. – С. 101-102.

45. Гамрекели М.Н. Эффективность мокрой очистки и утилизации тепла отработанного воздуха после распылительной сушки. // *Материалы Международной научно-технической конференции «Уралэкология. Техноген. Металлургия. – 2001»* (Экологические проблемы промышленных регионов). – Екатеринбург: Изд-во Дом «Урал-Принт», 2001. – С. 109.

46. Гамрекели М.Н. О циркуляции среды в факельной зоне струйной эжекционной камеры // Доклад на IV Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды» (Рыбинск, 23-25 сент. 1999г) – М.: Изд-

во УНПЦ «Энергомаш», 2001. – С. 118-120.

47. Гамрекели М.Н. Энергетическая модель расчета пневматической форсунки. // Доклад на IV Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды» (Рыбинск, 23-25 сент. 1999г) – М.: Изд-во УНПЦ «Энергомаш», 2001. – С. 181-184.

48. Гамрекели М.Н. Использование струйной эжекции для создания интенсивных экологически безопасных тепломассообменных аппаратов. // Доклад на IV Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды» (Рыбинск, 23-25 сент. 1999г) – М.: Изд-во УНПЦ «Энергомаш», 2001. – С. 202-203.

49. Гамрекели М.Н. Скорости капель в газодисперсном факеле. // *Материалы 5-ой Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды»* (13-15 сент. 2001г.) – М.: Изд-во УНПЦ «Энергомаш», 2001. – С. 55.

50. Гамрекели М.Н. Исследования дисперсности и концентрационных полей стесненного факела при пневматическом распыливании жидкости. // *Материалы 5-ой Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды»* (13-15 сент. 2001г.) – М.: Изд-во УНПЦ «Энергомаш», 2001. – С. 56.

51. Гамрекели М.Н. Исследование причин циркуляции, расчет времени пребывания частиц и траекторий течений в камерах распылительной сушки. // Доклад на Всероссийской научно-практической конференции «Химико-лесной комплекс – проблемы и решения» (9-11 апреля 2001г.) – Красноярск: СибГТУ, 2001. – Т.1. – С. 240-244.

52. Гамрекели М.Н. Кинетика прокалики солей в распылительном аппарате при получении окислов с высокой химической активностью. // Доклад на Всероссийской научно-практической конференции «Химико-лесной комплекс – проблемы и решения» (9-11 апреля 2001г.) – Красноярск: СибГТУ, 2001. – Т.1. – С. 244-247.

53. Гамрекели М.Н. Использование теории турбулентных струй для прогнозирования аэродинамики распылительных камер и оптимизации теплотехнологических процессов // Доклад на 1-ой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2002. – М. – Т.4. – С. 164-171.

54. Гамрекели М.Н. Факторы ограничения и интенсификации тепломассообмена в зоне активного испарения распылительных сушильных камер. // Доклад на 1-ой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2002. – М. – Т.4. – С. 172-176.

55. Гамрекели М.Н. Экологический характер ресурсосберегающих технических решений в производстве сухих дисперсных продуктов // *Материалы Международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса»*. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. – С. 89-91.

56. Гамрекели М.Н. Термический к.п.д. одно- и двухстадийных установок распылительной сушки. // *Материалы Международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса»*. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. – С. 222-223.

57. Гамрекели М.Н. Оценка погрешности измерений экранированной термпарой в распылительном сушильно-прокалочном аппарате // *Тр. ун-та / Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2002; Вып.2. – С. 101-106.*

58. Gamrekely M.N. Resource Saving Technical Decisions at Atomizing Drying and Calcinations. Proceedings of the 2-nd Nordic Drying Conference NDC'03. (25-27 June 2003). PS-11. – Copenhagen, Denmark. – 5 p.

59. Gamrekely M.N. Efficiency Analysis of the One and Two Stage Atomizing Drying Processes. Proceedings of the 2-nd Nordic Drying Conference NDC'03. (25-27 June 2003). PS-13. – Copenhagen, Denmark. – 7 p.

60. Gamrekely M.N. Calculation Method of Atomizing Drying Chamber by Means of the Experimental Kinetic Drying Curve Application. Proceedings of the 2-nd Nordic Drying Confer-



ence NDC'03. (25-27 June 2003). PS-15. – Copenhagen, Denmark. – 6 p.

61. Гамрекели М.Н. Системная оптимизация технологических и аппаратурных решений тепломассообменных установок по показателям термической эффективности // Доклад на V Минском Международном форуме по тепломассообмену (24-28 мая 2004г.). – Минск: Ин-т ТМО, 2004. – 10. – 11 с.

62. Гамрекели М.Н. Теплоперенос в факельную зону газоструйной камеры с высокотемпературной стенкой. // Материалы 6-ой Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды» (Рыбинск, 15-18 сент. 2004г.). – М.: Изд-во УНЦ «Энергомаш», 2004. – с. 154.

63. Гамрекели М.Н. Аэродинамика затопленной газовой струи в глухом канале // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды» (Рыбинск, 15-18 сент. 2004г.). – М.: Изд-во УНЦ «Энергомаш», 2004. – С.224.

64. Гамрекели М.Н. Определение свойств дисперсных продуктов распылительной сушки и эффективности оборудования газоочистки // Сб. лекций на V Международной теплофизической школе «Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством» (Тамбов, 20-24 сент. 2004 г.). – Тамбов: ТГТУ, 2004. – 5с.

65. Гамрекели М.Н. Методики экспериментальных исследований характеристик газодисперсного факела в распылительных камерах с теплоподводом от высокотемпературных стенок. (Там же). – 6с.

66. Гамрекели М.Н. Системность при многофакторной оптимизации тепломассообменного оборудования. // Доклад на 2-ой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и тепловые процессы) СЭТТ – 2005. – М. – 1. – С.145-147.

67. Гамрекели М.Н. Источники циркуляции в распылительных сушильных камерах. (Там же). – 182-184.

68. Гамрекели М.Н. Резервы повышения эффективности распылительной сушки в лесопромышленном комплексе. // Тезисы докладов V Международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса». – Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. – С. 123-124.

69. Гамрекели М.Н. Расходная характеристика газовой струи и газодисперсного факела // Химическая промышленность. – 2005. – 12. – С.15-17.

70. Гамрекели М.Н. Параметрические условия энергосбережения при распылительной сушке // Известия вузов. Пищевая технология. – 2006. – 1. – С.74-79.

71. Гамрекели М.Н. Экспериментальное исследование турбулентной струи в глухой камере // Известия вузов. Авиационная техника. – 2006. – 1. – С.15-17.

72. Гамрекели М.Н. Условия достижения предельных значений производительности по испаренной влаге установок распылительной сушки // Известия вузов. Лесной журнал. – 2006. – 1. – 138-144.

73. Гамрекели М.Н. Метод синтеза оптимальных аппаратурно-функциональных технических комплексов // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – 9. – С. 75-84.

74. Гамрекели М.Н. Скорость движения и время пребывания в газодисперсной круглой струе // Известия вузов. Лесной журнал. – 2006. – 5. – С.72-79.

75. Гамрекели М.Н. Графо-аналитическое исследование и обобщение технических решений по классам оборудования // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – 11. – С. 71-84.

#### Обозначения

$a_c$  – коэффициент структуры струи (коэффициент пропорциональности), для круглой струи  $a_c = 0,066$ ; для плоской –  $a_c = 0,1$ ; а.с.в. – абсолютно сухой воздух;  $b_0$  – ширина щели, м; В – влажность продукта, %;  $\bar{C}_m$  – средневзвешенное значение коэффициента лобового сопро-

тивления на пути торможения каплей среднего размера;  $D$  – диаметр;  $D_{в.п}$  – диаметр по внутренней границе восходящего вдоль стенки цилиндрической камеры потока газа;  $d_0$  – начальный диаметр струи (отверстия форсунки);  $d_{вл}$  – влагосодержание воздуха, г/кг;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести;  $g_{уд} = m_{г}/m_{ж}$  – удельный расход распыливающего воздуха на 1 кг жидкости, кг/кг;  $g'_m$  и  $g'_l$  – плотности орошения поперечного сечения по оси и в некоторой точке по радиусу камеры,  $10 \text{ л/м}^2$ ;  $H$  – высота, м;  $\theta$  – разность температур стенки и среды в некоторой точке по радиусу;  $K_p$  – коэффициент разбавления струи, который учитывает обмен количеством движения между газом и распыленной жидкостью;  $k_{к0} = \frac{\sum m_{к0}}{V_{г0}}$  – концентрация каплей в начальном объеме распыливающего воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;  $k_{фм} = m_{ф.т.}/m_0$  – массовый и  $k_{фв} = V_{ф.т.}/V_0$  – объемный показатели кратности циркуляции;  $L_{ф}$  – длина испаряющегося факела (длина зоны испарения), м;  $l_a$  – длина теплообменного участка камеры ниже факельной зоны, м;  $m$  – массовый расход, кг/ч;  $R$  – радиус;  $r$  – текущий радиус от оси аппарата, м;  $r_0$  – начальный радиус струи;  $r_{ф}$  – радиус чисто газовой струи в текущем поперечном сечении;  $T$  – температура, К;  $\bar{T}_1$  – начальная средняя температура среды на участке перегрева, К;  $T'_1$  – температура среды в начале зоны испарения, К;  $\bar{T}_2$  – конечная средняя температура среды на участке перегрева, К;  $\bar{T}'_2$  – средняя температура среды в конце зоны испарения, К;  $t$  – температура, °С; ТР – техническое решение;  $V$  – объемный расход,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ; объем,  $\text{м}^3$ ;  $w$  – скорость, м/с;  $x$  – расстояние от полюса струи до текущего сечения по оси струи (факела), текущая длина участка аппарата, м;  $y$  – текущая радиальная координата от оси струи в поперечном сечении камеры, м;  $\alpha_{ф}$  – угол факела, град;  $\Delta$  – разность;  $\tau$  – время, с;  $\varphi_{вл}$  – относительная влажность воздуха, %;  $\rho$  – плотность,  $\text{кг/м}^3$ .

#### Индексы

а – аппарат; в – воздух; вит – витание; в.п – восходящий поток; вх – значение параметра на входе; в.ц – вероятность циркуляции; вых – значение параметра на выходе; г – газ; г.р – газ распыливающий; ж – жидкость, раствор; ис – истечение; к – капля;  $k_0$  – относящиеся к каплям в начальный момент; км – камера; кн – конечный; пг – парогазовый; пр – приведенное значение; р – равновесное состояние; раствор; с – среда; см – газодисперсная смесь; сп – спутный (нисходящий) поток; ст – стенка; т – текущее значение параметра; у – установка; ф – факел; ф.т. – значение параметра в текущем поперечном сечении факела; м – значение параметра на оси струи; 0 – начальное значение.

#### Безразмерные параметры и области их изменения

Число подобия поглощающей способности облака каплей  $\frac{D_a K_{к0}}{d_{(3,2)к} \rho_{к0}} = (6,5-12,5)$ ; число

подобия теплообмена для зоны испарения  $\frac{T_{пр} - T'_1}{\bar{T}_{ст} - T'_1} = (0,93-4,65)$ ; длина не испарившегося

факела  $\frac{L_{ф}}{D_a} = (1,50-2,46)$ ;  $\frac{\bar{T}'_{ст}}{T'_1} = (2,4-3,7)$ ; число Фруда для газожидкостной струи на срезе

сопла форсунки  $Fr = \frac{w_{см}^2}{gd_0} = (0,16 \cdot 10^6 - 0,72 \cdot 10^6)$ ; длина зоны перегрева  $\frac{l_a}{D_a} = (0,71-5,26)$ ;

число подобия теплообмена зоны перегрева  $\frac{\bar{T}_2 - \bar{T}_1}{\bar{T}_{ст} - \bar{T}_{1,2}} = (0,06-3,25)$ .