

ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

КОНДРАТЬЕВ НИКОЛАЙ ВИКТОРОВИЧ

**КОАГУЛЯЦИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА
ПРИ РАСШИРЕНИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА
В ТУРБОДЕТАНДЕРЕ**

Специальность 05.04.03.

«Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники,
систем кондиционирования и жизнеобеспечения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск - 2004 г.

ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

КОНДРАТЬЕВ НИКОЛАЙ ВИКТОРОВИЧ

**КОАГУЛЯЦИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА
ПРИ РАСШИРЕНИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА
В ТУРБОДЕТАНДЕРЕ**

Специальность 05.04.03.

«Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники,
систем кондиционирования и жизнеобеспечения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Омск - 2004 г.

Работа выполнена на кафедре «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Галдин В.Д.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Матяш Ю.И.

кандидат технических наук, доцент
Бабенко Е.А.

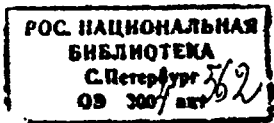
Ведущая организация: ООО НТК «Криогенная техника» г. Омск

Защита диссертации состоится «25» июня 2004г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.178.02 в Омском государственном техническом университете по адресу: 644050, пр. Мира 11, корпус 6, ауд. 6-340.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2004г.



Ученый секретарь
Диссертационного
совета
К.Т.Н., доцент

A handwritten signature in black ink, appearing to be "В.И. Юша", written over a horizontal line.

В.И. Юша

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На современных предприятиях во многих технологических процессах пищевой и нефтехимической промышленности, в торговле и машиностроении широко используется искусственный холод. При этом в качестве хладоносителей часто применяется сухой лед (твердый диоксид углерода, CO_2).

Твердый CO_2 используется в технологических процессах машиностроения, при холодной посадке деталей, холодной закалке специальных сталей. Сухой лед применяют для получения из него газообразного CO_2 высокой чистоты, необходимого при выполнении сварки особо ответственных деталей, для очистки поверхностей деталей и узлов от краски и эпоксидных смол. Получающийся при газификации CO_2 газ применяют для сварки паровых и газовых турбин, сосудов из металла большой толщины, работающих под давлением, в химической промышленности при обработке пластмасс и резино-технических изделий. Диоксид углерода применяют в сельском хозяйстве для повышения качества силоса. Использование CO_2 в процессах добычи нефти позволяет увеличить нефтеотдачу пластов на 8–16 % и ускорить темпы разработки нефтяных месторождений.

В последние годы разработке технологий и способов уменьшения выбросов CO_2 уделяется все больше внимания. В мировом масштабе 75–80 % выбросов CO_2 вызвано сжиганием органических топлив. Под влиянием накапливающихся в атмосфере многомолекулярных газов: водяного пара, диоксида углерода, оксидов азота и др., поглощающих инфракрасное излучение с поверхности земли, возникает «парниковый эффект», что способствует повышению температуры атмосферы, таянию ледников и нарушению погодообразования. При этом наибольший вклад в «парниковый эффект» (80%) вносят выбросы CO_2 . Указанные обстоятельства требуют интенсификации исследований по снижению выбросов CO_2 .

Одним из перспективных способов получения твердого CO_2 является его вымораживание из потока продуктов сгорания топлива (ПСТ), расширяющихся в турбодетандере (ТД).

Обзор исследования процессов расширения ПСТ в ТД и методов их расчета позволил установить, что до настоящего времени проблема получения твердого CO_2 из газовой смеси ПСТ с помощью ТД до конца не решена. Отсутствует математическая модель расширения ПСТ в детандере с учетом процесса коагуляции частиц твердого CO_2 . В методах расчета процессов расширения ПСТ не учтен ряд особенностей, связанных с коагуляцией и сепарацией частиц твердого CO_2 .

В следствии чего возникает необходимость и целесообразность в дальнейшей разработке элементов теории и анализа процессов расширения ПСТ в ТД.

Цель и задачи исследования. Основной целью работы являлось получение теоретически и экспериментально обоснованных рекомендаций по повышению выхода твердой фазы диоксида углерода из потока продуктов сгорания топлива на основе исследования процесса коагуляции.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи исследований:

1. Разработать обобщенную математическую модель течения ПСТ с образованием и коагуляцией частиц твердого CO_2 в проточной части турбодетандера.

2. Экспериментально подтвердить адекватность математической модели, применительно к процессу коагуляции частиц твердого CO_2 .

3. Исследовать влияние начальных параметров рабочего вещества и геометрии проточной части турбодетандера на интенсивность роста частиц в процессе коагуляции.

4. Провести анализ влияния процесса коагуляции частиц на характер изменения основных параметров потока в проточной части турбодетандера.

5. Выполнить анализ процесса коагуляции частиц твердого CO_2 на линии трубопровода детандер-сепаратор.

6. На основании обобщения результатов экспериментов и численного исследования на математической модели разработать рекомендации по рациональному конструированию кристаллизатора, предназначенного для увеличения размера частиц CO_2 в процессе их коагуляции.

7. Дать рекомендации по выбору сепаратора CO_2 .

• Методы исследования. В работе использован комплексный подход к решению рассматриваемой проблемы, включающий обобщение и анализ литературных материалов по процессам расширения парогазовой смеси в турбодетандере, и развитие теории коагуляции. Теоретические исследования проводились с применением современных методов численного решения задач.

Достоверность результатов работы обоснована применением фундаментальных законов физики, термодинамики и газодинамики, статистических методов обработки экспериментальных данных, удовлетворительным совпадением расчетных значений с экспериментальными результатами.

Автор выносит на защиту:

1. Математическую модель течения ПСТ с образованием и коагуляцией частиц твердого CO_2 в проточной части турбодетандера.

2. Результаты теоретического исследования процесса коагуляции частиц твердого CO_2 в проточной части турбодетандера и на линии трубопровода детандер-сепаратор.

3. Рекомендации по повышению выхода твердой фазы CO_2 из потока ПСТ.

4. Результаты экспериментального исследования коагуляции частиц твердого CO_2 .

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана обобщенная математическая модель течения ПСТ с образованием и коагуляцией частиц твердого CO_2 в проточной части турбодетандера.

2. Исследовано влияние начальных параметров ПСТ и геометрии проточной части детандера на рост частиц в процессе коагуляции.

3. Проведен анализ влияния процесса коагуляции частиц на характер изменения основных параметров потока в проточной части турбодетандера.

4. Выполнен анализ процесса коагуляции частиц CO_2 на линии трубопровода детандер-сепаратор.

Практическая ценность состоит в следующем:

- создан экспериментальный стенд для исследования процесса коагуляции частиц CO_2 ;
- даны рекомендации по рациональному конструированию кристаллизатора, предназначенного для увеличения размера частиц CO_2 в процессе их коагуляции;
- даны рекомендации по выбору сепаратора твердого CO_2 .

Реализация результатов. Результаты исследований используются в учебном процессе на кафедре «Теплоэнергетика» ОмГТУ.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены на МНТК «Динамика систем механизмов и машин» (Омск, ОмГТУ, 2002); II МНТК «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, СПбГУ-НиИПТ, 2003); НТК «Развитие оборонно-промышленного комплекса на современном этапе» (Омск, ОмГТУ, 2003).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 статьи, 4 тезиса докладов, 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы. Диссертации содержит: 124 страницы, 37 рисунков, 5 таблиц. Список литературы включает 134 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, научная и практическая значимость работы, сформулирована цель исследования и методы ее достижения, дано краткое содержание работы по главам.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы. С 1968 на кафедре холодильных машин СПбГАХиПТ проводятся работы по созданию установок получения твердого CO_2 из ПСТ. Создан экспериментальный стенд на базе регенеративной газовой холодильной машины с радиальным ТД. Эксперименты впервые подтвердили возможность вымораживания CO_2 из объема газового потока.

В 1971 году начаты работы по созданию установок для совместного производства теплоты, холода и твердого CO_2 в ОмГТУ под руководством В.И. Грищенко.

Исследования процесса получения твердого CO_2 при расширении ПСТ в ТД привели к появлению ряда теоретических работ:

Н.Н. Кошкиным и В.П. Суетиновым. разработана $h - d$ - диаграмма двухкомпонентной смеси воздух CO_2 ;

В.И. Грищенко и Ю.Д. Терентьевым создана методика термодинамического расчета процесса вымораживания CO_2 на базе уравнений теплового баланса и равновесия фаз компонентов, входящих в систему;

С.В. Варенковым предложена система уравнений расчета изоэнтропийного расширения двухфазного потока в проточной части радиального ТД. Исследована работа центростремительного ТД в режиме вымораживания твердой фазы CO_2 .

М.М. Даниловым предложен алгоритм расчета процесса вымораживания твердой фазы CCl_4 из газовых смесей в ТД, основанный на кинетике фазового перехода «пар - кристалл».

В.Д. Галдиным предложена математическая модель процесса расширения ПСТ в ТД с учетом элементов кинетики фазового перехода, реальных свойств рабочего вещества, изменение массы твердой фазы вдоль проточной части ТД, работы и теплоты сил трения.

Из обзора исследований процессов расширения ПСТ в ТД и методов их расчета установлено, что до настоящего времени проблема получения твердого CO_2 из ПСТ до конца не решена. Отсутствует математическая модель расширения ПСТ в детандере с учетом процесса коагуляции. Отсутствие исследований коагуляции осложняет анализ выбора способов сепарации частиц твердого CO_2 из газового потока.

Основателем теории коагуляции является Мариан Смолуховский. Существенный вклад в исследование процесса коагуляции применительно к разным разделам науки внесли А.Н. Колмогоров, Н.А. Фукс, В.М. Волошук, В.А. Галкин и ряд других авторов. Данные работы позволяют сделать вывод об удовлетворительном согласии между теорией и экспериментом. Анализ литературных данных позволил сформулировать цель и задачи исследований.

Во второй главе представлена математическая модель течения ПСТ с образованием и коагуляцией частиц CO_2 в ТД.

При достаточно большом содержании аэрозолей в единице объема необходимо учитывать их соударения между собой, что особенно важно для твердых, слипающихся при ударах (коагулирующих) частиц.

Результаты расчета процесса кристаллизации CO_2 из ПСТ при их расширении в ТД без учета процесса коагуляции, позволяют сделать вывод о том, что размеры образовавшихся в проточной части частиц не превышают 1 мкм. Данные частицы относятся к классу высокодисперсных аэрозолей (ВДА) и их можно рассматривать как гигантские газовые молекулы. Наиболее важным свойством ВДА считается то, что процессы переноса импульса, энергии и массы от частиц к среде и обратно, могут быть описаны газокинетическими формулами.

Существует ряд факторов влияющих на коагуляцию частиц: турбулентность газовой фазы, броуновское движение частиц, изменение скорости потока, оседание частиц под действием сил тяжести.

Коагуляция, вызванная турбулентностью газовой фазы, учитывается для частиц размеры которых превышают 1 мкм.

Частицы относящиеся к классу ВДА практически безинерционны, т.е. силы сопротивления и инерции для частиц данного класса в процессе изменения скорости газовой фазы очень малы. В следствии чего коагуляция вызванная изменением скорости потока для ВДА не учитывается.

Коагуляция, вызванная оседанием частиц под действием сил тяжести, учитывается для частиц размеры которых превышают 5 мкм.

Из вышеизложенного следует, что сближение частиц CO_2 , приводящее к их соприкосновению, может быть вызвано одним лишь броуновским движением. Этот тип коагуляции называется тепловой.

Кроме этого экспериментально установлено, что частицы размером менее 1 мкм при соударении слипаются, не зависимо от того твердые они или жидкие. Данное утверждение позволяет учитывать коагуляцию частиц при каждом их соударении.

При коагуляции большого числа частиц разных размеров образуется агломерат неопределенной формы. Для описания роста агломерата в процессе коагуляции используется средний радиус, описывающий объем этого комплекса.

Система уравнений (1), включающая в себя уравнения неразрывности, состояния, количества движения, сохранения энергии и уравнение кинетики фазовых превращений, описывает течение ПСТ с частичной кристаллизацией твердой фазы CO_2 . Уравнение (2) определяет критический радиус зародыша CO_2 , находящегося в термодинамическом равновесии с окружающей его газовой фазой. Скорость образования зародышей определяется по формуле Френкеля-Зельдовича (3). Рост частиц в зависимости от соотношения между длиной / свободного пробега молекулы и радиусом r частицы определяется уравнением (4).

Механизм тепловой коагуляции базируется на вероятностных функциях относительного теплового движения частиц и распределения частиц по объему. Коэффициент коагуляции (5) отражает вероятность столкновения частиц в единице объема за единицу времени. Уравнение (6) рассматривает непрерывное увеличение массы крупных частиц за счет их коагуляции с более мелкими, а уравнение (7) - уменьшение числа мелких частиц за счет поглощения их крупными. Уравнение (8) и (9) учитывают соответственно изменение массовой доли и размеров частиц каждой фракции в потоке газовой фазы.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\rho}{dx} = A_1 \frac{dc}{dx} - A_2 \frac{dg_T}{dx} - A_3 \frac{dF}{dx} + A_4 \frac{d\beta}{dx} + A_5 \frac{du}{dx}; \\ \frac{dp}{dx} = A_6 \frac{dT}{dx} + A_7 \frac{d\rho}{dx}; \\ \frac{dc}{dx} = A_8 \frac{dp}{dx} + A_9 \frac{d\beta}{dx} + A_{10} \frac{du}{dx}; \\ \frac{dT}{dx} = A_{11} \frac{dg_T}{dx} + A_{12} \frac{dc}{dx} + A_{13} \frac{dp}{dx} + A_{14} \frac{d\beta}{dx}; \\ \frac{dg_T}{dx} = \frac{4\pi}{3G} I_1 F_1 r_1 \rho_T + \frac{4\pi\rho_T}{G} \sum_{j=1}^{i-1} I_j F_j r_j^2 \Delta x \frac{dr_j}{dx}; \end{array} \right. \quad (1)$$

где ρ, p, T - плотность, давление и температура газовой фазы; c, u - абсолютная и переносная скорости потока; g_i - массовая концентрация твердой фазы; F - площадь поперечного сечения элемента проточной части; β - угол между векторами относительной скорости w и скорости u ; газовой фазы; A_1, A_2, \dots, A_{14} - коэффициенты, зависящие от геометрических и термогазодинамических параметров; l, F, r_i - скорость ядрообразования, площадь поперечного сечения и радиус частицы в сечении i ; ρ_l - плотность твердой фазы; Δx - отрезок пути потока на протяжении, которого возникла /-я группа частиц.

$$r_{KP} = \frac{2\gamma}{\rho_l L \ln(T_s / T)}, \quad (2)$$

где γ - коэффициент поверхностного натяжения; L - теплота фазового перехода; T_s - температура насыщения.

$$I = 1,13 \cdot 10^{33} \frac{\sqrt{\gamma}}{\rho_l} \left(\frac{r_c p}{T} \right) \exp(-3,03 \cdot 10^{23} \gamma r_{KP}^2 / T), \quad (3)$$

где r_c - объемная концентрация CO_2 .

$$\frac{dr}{dx} = \frac{c_{pH} p_H}{cL \rho_T} \sqrt{\frac{R_H T_T - T}{2\pi(1 - 2\gamma_r l(\rho_T rL))}} \quad l/2r > 1; \quad \frac{dr}{dx} = \frac{\lambda}{c\rho_H L} \frac{T_T - T}{r} \quad l/2r < 1, \quad (4)$$

где c_{pH} - теплоемкость пара; p_H - парциальное давление паров CO_2 в ПСТ; R_H - газовая постоянная пара; T_T - температура частиц CO_2 ; λ - коэффициент теплопроводности ПСТ.

$$K(r_i, r_j) = \pi(r_i + r_j)^2 (\overline{c_w} + \overline{c_y}) / 4, \quad (5)$$

где c_y - скорость частицы.

$$\frac{dm_i}{dx} = \frac{1}{c} \sum_{j=1}^i K_{ij} n_j m_j, \quad (6)$$

где n - число частиц в единице объема; m - масса частицы.

$$\frac{dn_i}{dx} = -\frac{n_i}{c} \sum_{j=i}^n K_{ij} n_j, \quad (7)$$

$$\frac{dg_i}{dx} = \frac{1}{c\rho} (n_i \sum_{j=1}^i K_{ij} n_j m_j - m_i n_i \sum_{j=i}^n K_{ij} n_j); \quad (8)$$

$$\frac{dr_i}{dx} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{3dm_i}{4\pi\rho}}. \quad (9)$$

Математическая модель позволяет определить размеры частиц CO_2 при расширении ПСТ в турбодетандере с учетом коагуляции.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям процесса коагуляции частиц твердого CO_2 .

Для исследования процесса коагуляции CO_2 в лаборатории кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ был разработан и создан экспериментальный стенд.

При открытии вентиля углекислотного баллона 1 в диффузоре 2 и трубе 3 происходит истечение газа с образованием частиц твердого CO_2 . При освещении диапроекторами 4 через линзы участков (точек), расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга поперек потока, образуются четыре луча света,

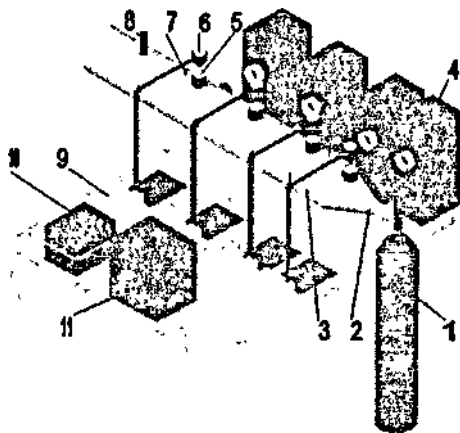


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 - углекислотный баллон; 2 - диффузор; 3 - труба; 4 - источник света; 5 - линзы; 6 - оптические датчики; 7 - термометры сопротивления; 8 - анемометр; 9 - блоки питания ФЭУ; 10 - прибор Ф-266; 11 - шлейфовый осциллограф

пронизывающие исследуемый объект. При движении двухфазного потока через эти участки на частицы падает световой поток, при этом каждая частица становится источником рассеяния света.

Под углом 90° от светового источника располагаются оптические датчики 6, фиксирующие суммарное изменение интенсивности отраженного от частиц света. Для снятия показаний с оптических датчиков применялся шлейфовый осциллограф 11. Температура газового потока измерялась термометрами сопротивления 7. Скорость потока на выходе из трубы измерялась анемометром 8.

При исследовании процесса коагуляции необходимо качественно определить число и размеры частиц в просвечиваемом объеме. Для получения необходимых характеристик применяется оптический метод измерения, использующий явление рассеяния света при прохождении его через мутную среду. Для достижения

равенства температур по линии течения потока перед снятием показаний с датчиков диффузор и труба охлаждается, с помощью жидкого азота.

При попадании светового потока на объем двухфазной среды, каждая частица становится источником рассеяния света. Размеры частиц, и число их в просвечиваемом объеме определяют характер и интенсивность рассеяния света.

По измерениям ослабления света с применением таблиц светорассеяния определяется радиус частицы. Измерения, выполненные для разных длин волн проходящего света, используются для вычисления радиуса и числа частиц в объеме.

Для проверки адекватности уравнений коагуляции необходимо теоретически определить распределение спектра частиц по количеству и размерам в каждой точке просвечиваемого объема.

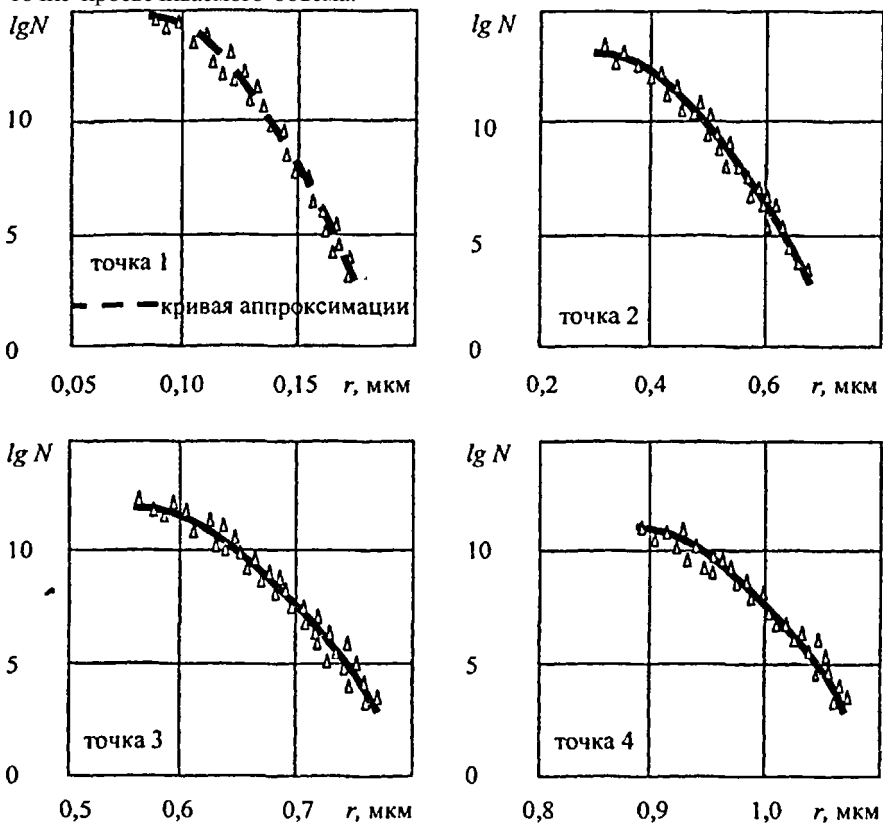


Рис. 2 Сопоставление экспериментальных и расчетных данных
 ———— - расчетные данные; Δ - результаты эксперимента

С применением методики К.С. Шифрина были обработаны результаты экспериментального исследования для каждой точки, в которых проводилось снятие показаний оптическими датчиками. Полученные качественные результаты в виде экспериментальных данных представлены на рис. 2.

Для теоретического расчета процесса коагуляции необходимо определить начальные условия распределения спектра частиц по количествам и размерам в просвечиваемом объеме. Для этого были использованы результаты, полученные при проведении эксперимента в точке 1. Полученные экспериментальные значения в точке 1 аппроксимировались в кривую. Эти результаты использовались как начальные условия для теоретического расчета процесса коагуляции.

С применением уравнений математической модели теоретически определены изменения размеров и числа частиц в процессе их коагуляции в точках 2,3,4.

Эксперимент показал, что интенсивность отраженного света от частиц при течении двухфазного потока вдоль диффузора и трубы уменьшается. Уменьшение интенсивности светового потока, на участке трубы и диффузора длиной один метр, говорит о том, что на этом участке частицы растут. Измерения температуры вдоль потока в диффузоре и трубе не выявили заметной разности в показаниях термометров сопротивления. Это говорит об отсутствии роста частиц за счет переохлаждения потока. На основании чего предполагается наличие роста частиц за счет процесса тепловой коагуляции.

Расхождение между экспериментальными и расчетными данными в точках 2,3,4 составило менее 20 %.

В четвертой главе представлены результаты теоретического исследования процесса коагуляции частиц твердого CO_2 .

На рис. 3 представлены некоторые результаты исследования процесса расширения ПСТ в проточной части турбодетандера с учетом коагуляции частиц СОР. расчетные параметры приняты следующие: давление на входе в детандер $p_0 = 0,2$ МПа; расход ПСТ соответствует степени расширения $\pi_{II} = 2$; начальная массовая концентрация CO_2 в рабочем веществе $g_{II} = 0,2$; угол в сопловом аппарате $\alpha_{II} = 13^\circ$.

При расширении ПСТ температура потока T снижается, при чем темп ее снижения выше, чем температуры насыщения T_S .

Разность температур $\Delta T = T_S - T$ (переохлаждение) является главным фактором влияющим на процесс кристаллизации твердой фазы. При наличии переохлаждения происходит образование и рост частиц твердого CO_2 в проточной части ТД. При малых ΔT , образуется сравнительно небольшое число зародышей, на которых происходит кристаллизация пара вплоть до полного снятия переохлаждения. При этом выделяется часть твердой фазы, вследствие чего радиус относительно небольшого числа частиц увеличивается. Рост частиц в результате процесса коагуляции на данном этапе практически не происходит из-за низкой концентрации числа образовавшихся зародышей. Со снижением температуры по ходу потока разность температур ΔT быстро нарастает вследствие этого активизируется все большее число зародышей, способных повлиять на рост частиц в процессе их коагуляции.

При $\Delta T = 12,5-13$ К возникает огромное число зародышей и резко возрастает массовая концентрация твердого CO_2 . Температура потока увеличивается и приближается к температуре насыщения T_S .

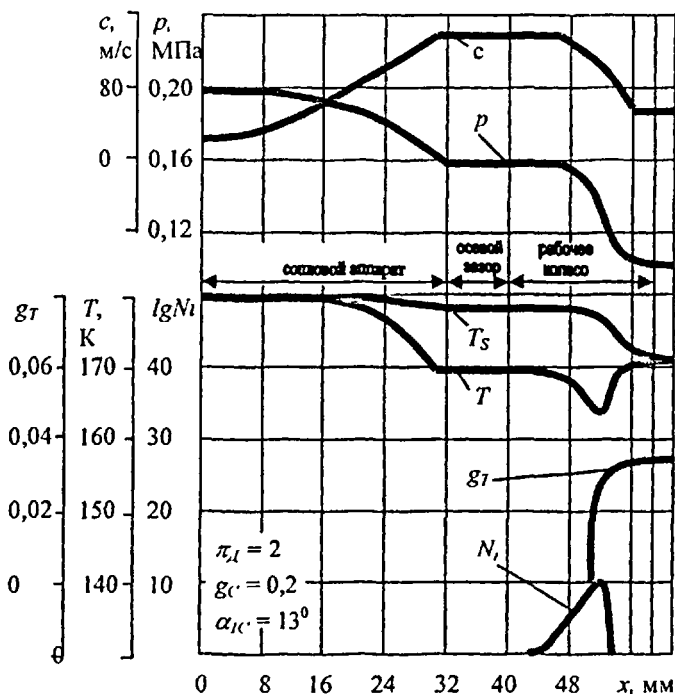


Рис. 3. Изменение параметров ПСТ в проточной части ТД с учетом процесса коагуляции: c , p и T - абсолютная скорость, давление и температура потока; T_S - температура насыщения; N_i - число частиц образовавшихся в пределах условных сечений рабочего колеса; g_T - массовая концентрация твердой фазы

В области максимального переохлаждения, называемой зоной Вильсона, наблюдается бурная спонтанная кристаллизация CO_2 , сопровождающаяся выделением скрытой теплоты фазового перехода. Значительное увеличение числа частиц в зоне Вильсона приводит к их росту в процессе коагуляции. Так как за зоной Вильсона происходит дальнейшее расширение парогазовой смеси в рабочем колесе, то переохлаждение ΔT потока остается, несмотря на продолжающийся процесс кристаллизации.

Анализ зависимости числа частиц N_i показывает, что самой многочисленной является группа частиц образовавшаяся при наибольшем значении ΔT . Как только прирост массы твердой фазы становится достаточно большим, температура пара начинает быстро расти, а ΔT - уменьшаться. Это замедляет рост радиуса

частиц в процессе теплообмена и массовой концентрации твердой фазы g_t , что уменьшает темп снижения ΔT .

Спонтанная кристаллизация наблюдается в последней трети рабочего колеса. Первые частицы образуются в сечении $x = 43$ мм, последние при $x = 53$ мм. По мере движения вдоль проточной части образовавшиеся частицы увеличиваются в размере, образуя непрерывный спектр. Незначительное число твердых частиц, образовавшиеся в сечении $x = 43$ мм, являются наиболее крупными, а частицы, возникшие в зоне максимального переохлаждения наиболее мелкими.

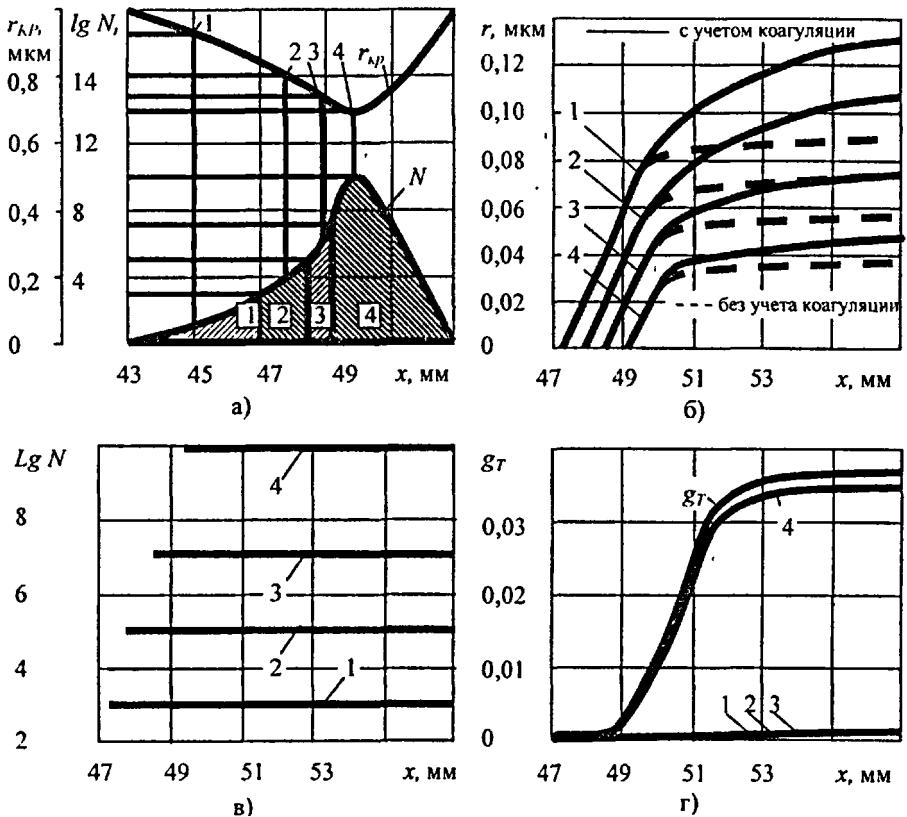


Рис. 4 Изменение основных показателей при тепловой коагуляции в проточной части ТД

Сравнительный анализ полученных результатов с результатами, полученными без учета коагуляции частиц, позволяет сделать вывод о том, что в области исследуемых газодинамических ($\pi_{tl} = 1,8 - 2,4$, $g_t = 0,05 - 0,2$) и геометрических

($\alpha_{\kappa} = 6^{\circ} 52' - 20^{\circ} 24'$) параметров процесс коагуляции практически не влияет на характер изменения T, p, ρ, c в ТД

Для упрощения анализа процесса коагуляции, весь спектр образовавшихся частиц заменяется на четыре фракции (рис. 4 а), позволяющие отобразить рост частиц и изменение их числа с учетом коагуляции.

Анализ зависимости (рис. 4 б) изменения среднего радиуса частиц различных фракций показывает, что образовавшиеся частицы CO_2 при течении вдоль проточной части растут. Радиус частиц первой фракции без учета процесса коагуляции на выходе из ТД составил 0,09 мкм, с учетом коагуляции - 0,13 мкм. Для более мелких частиц других фракций (фракции 2,3, 4) это изменение меньше.

Процесс коагуляции практически не влияет на изменение числа (рис. 4 в) и массовых долей (рис 4 г) фракций в проточной части ТД. Изменение массовых долей происходит в результате тепломассообмена твердой фазы с ПСТ. На рис. 5 показано изменение радиуса частиц фракций CO_2 на выходе из рабочего колеса ТД в зависимости π_{κ}, g_{κ} при $\alpha_{\kappa} = 13^{\circ}$. Анализ зависимости показывает, что при увеличении g_{κ} и π_{κ} размеры частиц возрастают. Это связано с тем, что увеличение g_{κ} и π_{κ} , по уравнению (3), приводит к возрастанию скорости ядрообразования, и как следствие к увеличению числа частиц N в единице объема. При увеличении N , происходит повышение интенсивности роста частиц в процессе коагуляции.

Анализ зависимости радиуса частиц фракций CO_2 на выходе из рабочего колеса ТД от выходного угла α_{κ} профиля лопаток соплового аппарата при $\pi_{\kappa} = 2$ и $g_{\kappa} = 0,2$ свидетельствует о том, что уменьшение угла α_{κ} от 13° до 8° приводит к незначительному росту частиц. С уменьшением α_{κ} зона ядрообразования смещается к входному сечению канала проточной части ТД, это приводит к увеличению времени нахождения и коагуляции частиц в рабочем колесе, и как следствие к их росту в результате процесса тепломассообмена и коагуляции.

Изменение размеров частиц всего спектра для исследованных режимов работы ТД и геометрии проточной части составило не более 6 %.

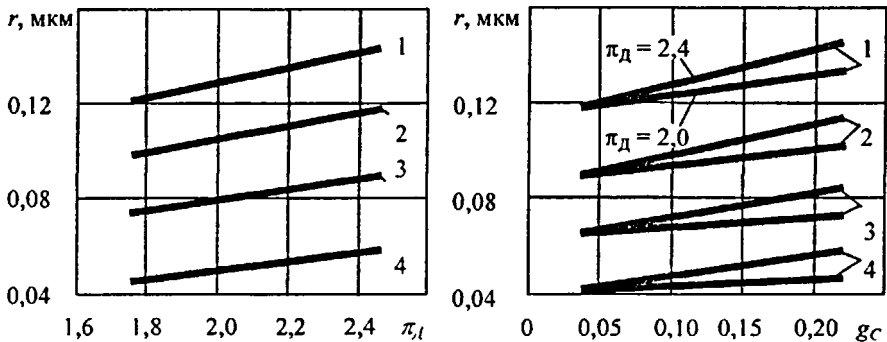


Рис. 5 Изменение радиуса r частиц различных фракций на выходе из рабочего колеса в зависимости от π_{κ} и g_{κ}

Рост частиц в процессе коагуляции продолжается за проточной частью ТД на линии трубопровода детандер-сепаратор. На рис. 6 представлено изменение радиуса, числа, массовых долей и коэффициента коагуляции частиц различных фракций на линии трубопровода детандер-сепаратор. Начало отсчета трубопровода ведется от ТД.

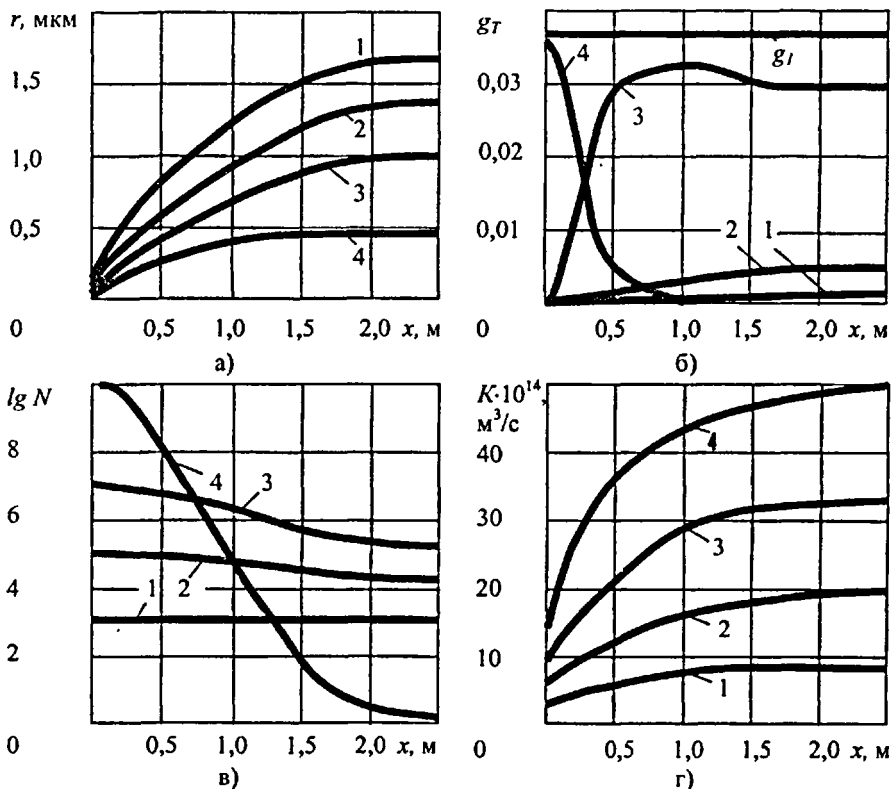


Рис. 6 Изменение радиуса r , числа N , массовой концентрации g_T и коэффициента коагуляции K частиц различных фракций на линии трубопровода детандер-сепаратор

Когда число мелких частиц (фракция 4) значительно преобладает над более крупными (рис. 6, в) происходит интенсивный рост частиц в процессе их коагуляции. Когда число мелких частиц становится соизмеримо с числом более крупных, интенсивность роста частиц при коагуляции постепенно затухает, и процесс тепловой коагуляции почти полностью заканчивается на расстоянии $x = 2$ м от ТД (рис 6, а). Преобладающей является фракция 3 со средним радиусом ~ 1 мкм.

Изменение массовой доли частиц более сложно (рис 6, б) Для мелких частиц (фракция 4) она уменьшается вследствие поглощения крупными частицами, а для крупных частиц (фракции 1,2)- возрастает. Массовая доля частиц промежуточных размеров (фракция 3) сначала возрастает, а затем по мере исчезновения мелких частиц начинает уменьшаться.

На рис. 6, г представлены значения коэффициента коагуляции частиц различных фракций вдоль трубопровода. Коэффициент коагуляции возрастает по мере движения потока вдоль трубопровода. Это связано с ростом размеров частиц при их коагуляции. Для крупных фракций коэффициент коагуляции в несколько раз выше, чем для мелких. Это связано с тем, что вероятность столкновения крупных частиц с более мелкими больше по сравнению с вероятностью столкновения мелких частиц друг с другом.

При коагуляции крупных частиц мелкими размер получившихся агломератов практически не отличается от размеров крупных частиц. Данный эффект уменьшает полидисперсность аэрозолей в потоке при их коагуляции.

Одним из важных критериев оценки процесса коагуляции является время за которое происходит полная тепловая коагуляция частиц. Это время зависит от числа и начальных размеров частиц в единице объема, которые в свою очередь определяют параметрами переохлаждения потока, массовой концентрацией ПСТ, давлением на входе в ТД и геометрией проточной части.

При течении ПСТ за ТД в следствии увеличения проходного сечения канала происходит уменьшение скорости потока. Время процесса тепловой коагуляции не зависит от изменения скорости потока. Изменение скорости потока приводят лишь к смещению сечения завершения процесса коагуляции вдоль трубопровода рис. 7. Данная зависимость позволяет по известной скорости газовой фазы определить место расположения сечения завершения процесса тепловой коагуляции.

Так, например, если скорость в трубопроводе составляет 20 м/с, то процесс тепловой коагуляции закончится в пределах одного метра от ТД.

В разработанном ТХЭА в качестве сепаратора был установлен циклон. Экспериментальные исследования показали относительно низкую эффективность сепарации частиц. Это было связано с их малыми размерами на входе в сепаратор. На основании выполненных исследований предлагается инженерное решение, задачей которого является увеличение размеров частиц за счет их кинематической коагуляции и как следствие повышение выхода твердой фазы CO_2 . Кинематическая коагуляция частиц происходит в процессе изменения скорости газовой фазы. Указанная задача достигается тем, что между ТД и сепаратором дополнительно устанавливается кристаллизатор (рис 8). Кристаллизатор состоит их стабилизирующего канала 1 и диффузора 2

Расчетами установлено, что облако частиц средним радиусом $r = 0,05$ мкм ведет себя аналогично газовой примеси. Эти частицы практически не реагируют на изменение скорости потока вследствие их небольших размеров. Частицы радиусы которых превышают 1 мкм подвержены влиянию изменения скорости потока. При изменении скорости потока частицы размеры, которых лежат в пределах 1 мкм под действием сил сопротивления и инерции приобретут различные скоро-

сти движения. Это приведет к увеличению размеров частиц в процессе их кинематической коагуляции.

При течении ПСТ за ТД без кристаллизатора, за счет увеличения проходного сечения канала происходит уменьшение скорости потока. В данном случае рост частиц в следствии кинематической коагуляции не происходит в виду того, что они будут меньше 1 мкм.

Принцип работы кристаллизатора. После ТД устанавливается стабилизирующий канал таким образом, что бы скорость потока по всей длине трубопровода была постоянной. Далее в сечении завершения процесса тепловой коагуляции, там, где частицы имеют средний радиус ~ 1 мкм, устанавливается диффузор для понижения скорости потока. Понижение скорости потока в диффузоре приведет к росту частиц в процессе их кинематической коагуляции. Рост частиц на входе в сепаратор приведет к повышению выхода твердой фазы CO_2 в сепараторе.

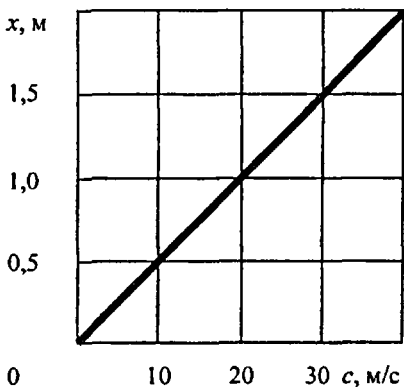


Рис. 7. Зависимость места расположения сечения завершения тепловой коагуляции от скорости потока в трубопроводе

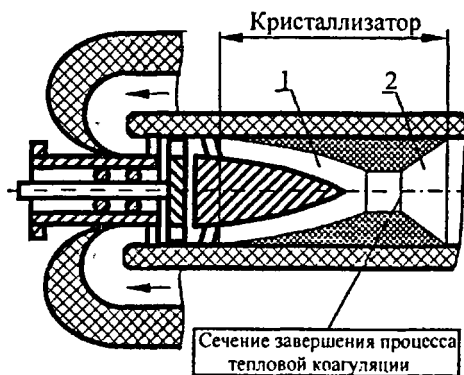


Рис. 8. Схема установки кристаллизатора

Исследования процесса коагуляции на линии трубопровода детандер-сепаратор выявили, что средний радиус частиц с учетом коагуляции не превышает 2 мкм. Из таблицы 1 видно, что эффективность очистки циклонов для частиц размеры которых не превышают 5 мкм менее 60%, а эффективность очистки рукавного фильтра для частиц более 0,5 мкм - 99%.

Учитывая приведенные результаты, предлагается дополнительно установить или заменить циклон на рукавный фильтр, который имеет более высокую эффективность отделения частиц в данных условиях. Это позволит повысить выход твердой фазы CO_2 .

Таблица 1

Тип очистки	Диазон Улавливаемых частиц	Эффективность очистки мелких фракций	Сложность изготовления и установки	Надежность	Эксплуатационные энергозатраты
	Мкм	%	по пятибалльной шкале		в % отн. электр.в
Циклоны	от 5	60-70	1	5	25
Рукавные фильтры	от 0,5	99	4	3	75
Электро-фильтры	от 0,5	99	5	3	100

Выводы

1. Разработана обобщенная математическая модель течения ПСТ с образованием и коагуляцией частиц твердого CO_2 в проточной части турбодетандера, при решении которой установлено:

- при течении ПСТ в проточной части турбодетандера процесс коагуляции не вызывает значительный рост частиц твердого CO_2 ;
- при всех режимных и геометрических параметрах, представляющих практический интерес, заметный рост частиц в процессе их коагуляции не происходит, изменение размеров и числа частиц в исследуемом диапазоне работы детандера составляет не более 6 %;
- расчетами не выявлено заметного влияния коагуляции частиц на характер изменения давления, плотности, скорости, температуры, переохлаждение потока, массовой концентрации твердой фазы и скорости ядрообразования вдоль проточной части турбодетандера;
- в исследованном диапазоне режимных и геометрических параметров проточной части диаметр частиц на выходе из рабочего колеса турбодетандера не превышал 1 мкм, что меньше допустимых размеров по условиям износа;
- процесс коагуляции происходит на относительно малой длине рабочего колеса и продолжается за проточной частью турбодетандера.

2. Экспериментально подтверждена адекватность математической модели применительно к процессу коагуляции частиц CO_2 . Показано качественное совпадение расчетных и экспериментальных данных. Расхождение между ними составило менее 25 %.

3. Создан экспериментальный стенд для исследования коагуляции частиц твердого CO_2 .

4. Проведен анализ процесса коагуляции частиц CO_2 на линии трубопровода детандер-сепаратор. Установлено:

- в области исследуемых параметров процесс коагуляции практически полностью заканчивается в трубопроводе на расстоянии двух метров от турбодетандера. Средний размер частиц при этом составляет ~ 1мкм;

- процесс тепловой коагуляции уменьшает полидисперсность аэрозолей в потоке газа;
- интенсивность процесса коагуляции не зависит от скорости потока.

5. На основании обобщения результатов экспериментов и численного исследования на математической модели даны рекомендации по конструированию кристаллизатора, предназначенного для увеличения размера частиц твердого CO_2 в процессе их коагуляции. Получен патент на полезную модель.

6. С учетом всех выше изложенных результатов экспериментальных и теоретических исследований даны рекомендации по выбору сепаратора выделяющего твердую фазу из газового потока ПСТ.

Список публикаций по теме диссертации

1. Галдин, В.Д. Установка для производства твердого диоксида углерода из дымовых газов / Галдин В.Д., Кондратьев Н.В., Крюков А.В. // Динамика систем механизмов и машин: Тез. докл. II Междунар. науч.-техн.конф. (12-14 нояб. 2002 г.). - Омск, 2002. - С. 415.
2. Галдин, В.Д. Математическая модель коагуляции твердого диоксида углерода при расширении дымовых газов в турбодетандере / Галдин В.Д., Кондратьев Н.В. // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: Тез. докл. II Междунар. науч.-техн.конф. (9-12 нояб. 2003 г.). - С. Пб, 2003. - Ч. 2. - С. 228-232.
3. Галдин, В.Д. Математическая модель коагуляции твердого диоксида углерода при расширении дымовых газов в турбодетандере / Галдин В.Д., Кондратьев Н.В. // Динамика систем механизмов и машин: Тез. докл. II Междунар. науч.-техн.конф. (12-14 нояб. 2002 г.). - Омск, 2002. - С. 415.
4. Галдин, В.Д. Математическая модель коагуляции твердого диоксида углерода при расширении дымовых газов в турбодетандере / Галдин В.Д., Кондратьев Н.В. // Омский научный вестник. - Омск: ОмГТУ, 2002. - Вып. 21. - С.70-72.
5. Галдин, В.Д. Результаты расчета математической модели коагуляции твердого диоксида углерода при расширении продуктов сгорания топлива в турбине. / Галдин В.Д., Кондратьев Н.В. Осипов А.В. // Развитие оборонно-промышленного комплекса на современном этапе: Тез. докл. науч.-техн. конф. (4-6 июня 2003 г.). - Омск, 2003. - С. 119.
6. Галдин, В.Д. Результаты расчета процесса коагуляции твердого диоксида углерода при расширении дымовых газов в турбодетандере / Галдин В.Д., Кондратьев Н.В. // Омский научный вестник. - Омск: ОмГТУ, 2003. - Вып. 21. - С.80-83.
7. Пат. на полезную модель № 32831 Россия, МПК F 01 K 25/00. Комплексная парогазовая установка. / Галдин В.Д., Кондратьев Н.В. (Россия). - № 2003115262; Заявлено 23.05.03; Оpubл. 27.09.03, Бюл. № 27. - 2 с: ил.

Отпечатано с оригинала-макета, предоставленного автором

ИД №06039 от 12.10.2001

Подписано к печати 24.05.2004. Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16

Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Заказ 336.

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр-т. Мира, 11

Типография ОмГТУ

04 - 14044