На правах рукописи

УДК 621.1.016

СМОРОДИН АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ С ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Специальность 05.04.03. Машины, аппараты и процессы холодильной и криогенной техники, системы кондиционирования и жизнеобеспечения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 2004

Работа выполнена в ОАО "КРИОГЕНМАШ" и МГТУ им. Н.Э. Баумана

Научный консультант: доктор технических наук, профессор **А.М. Архаров**

Официальные оппоненты: доктор технических наук **Красникова О.К.;**
доктор технических наук, профессор **Иванов Б.А.;**
доктор технических наук, профессор **Борзенко Е.И.**

Ведущая организация: ФГУП Научно-исследовательский институт химического машиностроения (НИИХИММАШ), г. Пересвет Сергиево-Посадского р-на М.О.

Защита состоится 01 июля 2004 года в 14^{30} час. на заседании диссертационного совета Д.212.141.16 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, корпус факультета "Энергомашиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в 2 экз., заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005. г. Москва, 2-ая Бауманская, д.5, Ученому секретарю диссертационного Совета Д.212.141.16.

Автореферат разослан "28" мая 2004 г.

Желающие присутствовать на защите должны заблаговременно известить совет письмами заинтересованных организаций председателя Совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.141.16
кандидат технических наук Глух

1680430
Смоходин Н.Г. Создание и исследование

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации обусловлена расширяющимся применением в индустриально развитых странах жидкого водорода, кислорода, а в последние годы озона для реализации экологически чистых процессов в основных отраслях промышленности, обеспечивающих ускоренный прогресс общества.

Одной их важнейших особенностей водорода, кислорода и озона является их экологическая нейтральность: процессы, в которых они участвуют, являются, как правило, экологически чистыми. Применение кислорода и озона, например, для отбеливания целлюлозы взамен хлора, очистки жидких радиоактивных отходов, рециклинга отработанных автомобильных покрышек и многое другое позволяют надеяться, что природа будет в определенной степени защищена.

Применение водорода в качестве топлива в авиации, ракетно-космической технике и на автомобильном транспорте сдерживается высокой стоимостью получения жидкого водорода по сравнению с традиционными топливами. Одной из особенностей технологии получения жидкого параводорода является процесс орто-парапревращения, сопровождающийся выделением теплоты за счет переориентации ядерных спинов, энергетические затраты на который могут составлять до 30 % всех затрат на ожижение. Очевидно, что рациональное проведение процесса орто-парапревращения является одним из определяющих факторов, влияющих на общую экономичность, поэтому необходимы проведение поисковых исследований, разработка методов расчета и создание эффективных и компактных аппаратов-конверторов.

Применение жидкого кислорода в ракетно-космической технике в значительной мере определяется уровнем его охлаждения вплоть до температуры тройной точки. Охлаждение кислорода до температуры 57 К в процессе заправки космического корабля "Буран" осуществлялось за счет потока газообразного водорода с температурой 17 К с использованием промежуточного теплоносителя - гелия. Процесс охлаждения кислорода в теплообменном аппарате происходит в неординарных условиях, когда значительная величина теплообменной поверхности имеет температуру ниже температуры тройной точки кислорода (54,3 К), что предопределяет исследование закономерностей теплообмена и гидравлического сопротивления в этих условиях и поиск путей снижения негативного влияния образовавшейся твердой фазы.

Озон занимает особое место среди традиционно применяемых окислителей, отличаясь высокой реакционной способностью и нестойкостью. Применение озона способствует созданию экологически лояльных производств. Основными технологическими процессами, в которых применение озона технически и экономически оправдано, являются:

МГТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

- очистка (обеззараживание) питьевой воды;
- очистка промышленных стоков (в металлургии, нефтепереработке, на целлюлозно-бумажных комбинатах, на автомойках и др.);
- бесхлорное отбеливание целлюлозы;
- переработка жидких радиоактивных отходов;
- рециклинг изношенных автопокрышек.

Электросинтез озона в газовом барьерном разряде является единственной из известных реакций, происходящих с образованием озона из кислорода. Эта реакция эндотермична, ее тепловой эффект равен 142 кДж/моль, а молекула озона по сравнению с кислородом обладает значительным запасом внутренней энергии. Окислительные реакции с озоном возможны при нормальных давлениях и температурах.

В настоящее время генераторы для производства озона, созданные крупнейшими американскими и европейскими фирмами за все годы своего существования, представляют из себя кожухотрубный теплообменный аппарат с прямыми трубами длиной до 3 метров, в которые установлены стеклянные трубы (в виде колб) со слоем алюминия на внутренней поверхности трубы. Зазор между стеклянной и металлической трубами составляет 0,7 - 2,0 мм. В одном аппарате производительностью 25-30 кг озона в час концентрацией 15-20 гO_3/м^3 количество таких труб достигает 850 штук. Удельный выход озона с единицы поверхности составляет 0,8-1,2 г/ч·дм^2. Появившаяся в последние годы новая технология "АТ-95", по которой вместо стеклянных устанавливают покрытые стеклоэмалью несколько коротких труб длиной 0,53 м, позволила увеличить этот показатель до 2,4 г/ч·дм^2. Но, по-видимому, это тот предел, который невозможно преодолеть, т.к. при такой конструкции генератора озона и электродов невозможно организовать внутреннее охлаждение электрода. Поэтому был необходим поиск новой конструкции электродов и на их основе новой конструкции генератора озона, которые бы обеспечили более высокий выход озона с единицы поверхности, что дает существенное уменьшение активной поверхности электродов и металлоемкости генератора озона.

Общим для процессов орто-параконверсии водорода, охлаждения кислорода до температуры близкой к температуре тройной точки и получения озона из кислорода (или воздуха) являются фазовые переходы на границе раздела взаимодействующих сред и экологическая значимость этих процессов. По этой причине такие разные по своей сути процессы объединены в данной работе.

Цель работы - Теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена с фазовыми превращениями на рабочих поверхностях, разработка методов расчета аппаратов, основ их конструирования и создание промышленных образцов изделий низкотемпературной техники.

Для достижения поставленной цели необходимо было:

– разработать теорию процесса орто-параконверсии водорода при различных способах его реализации в адиабатических, изотермических и политермических условиях, на основании которой установить взаимосвязь основных конструктивных и технологических параметров, обеспечивающих проведение процесса;

– разработать методы расчета аппаратов орто-параконверсии и основы проектирования системы конверторов ожижителей водорода низкого, среднего и высокого давлений;

– получить экспериментальные данные по локальному распределению температур и содержанию параводорода в аппаратах при различных методах реализации процесса орто-параконверсии;

– изучить особенности теплообмена при охлаждении жидкости хладагентом, имеющим температуру на входе в аппарат ниже температуры тройной точки охлаждаемой жидкости; на основании проведенных исследований предложить эффективные решения реализации процесса;

– разработать методику расчета аппаратов и определить условия, при которых влияние образовавшейся на разделительной поверхности твердой фазы минимально;

– выявить закономерности конвективного теплообмена с учетом образовавшейся на поверхности раздела взаимодействующих сред твердой фазы;

– установить взаимосвязь между характеристиками процесса получения озона и конструктивными параметрами системы электродов на основе представления об "идеальном" генераторе озона;

– разработать оптимальную конструкцию электрода и блока электродов и провести исследования их гидравлических, прочностных и адгезионных характеристик;

– создать и исследовать опытно-промышленный генератор озона, изготовленный с применением нетрадиционных технологий.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- развита теория процесса орто-параконверсии водорода при различных способах его реализации в адиабатических, изотермических и политермических условиях, на основании которых установлена взаимосвязь основных параметров, обеспечивающих проведение процесса в оптимальных условиях;

- полученные теоретические результаты положены в основу создания методов расчета аппаратов орто-параконверсии и основ проектирования сложных систем орто-параконверсии для ожижителей водорода низкого, среднего и высокого давлений в интервале температур от 68 до 24 К;

- получены новые экспериментальные данные по локальному распределению температуры и содержанию параформы в потоке водорода

высокого давления в реальном процессе его охлаждения в слое катализатора, которые подтвердили основные положения разработанной теории;

- впервые в мировой практике предложен способ охлаждения кислорода до температуры близкой к температуре тройной точки (57 К) гелием высокого давления, циркулирующим в замкнутом контуре и охлаждаемым потоком газообразного водорода с температурой 17 К;

- на основе результатов экспериментальных исследований процесса охлаждения модельной и реальной жидкостей хладагентом с температурой ниже температуры тройной точки показана возможность применения для расчетов аппаратов-охладителей зависимостей по теплообмену и гидравлическому сопротивлению для пучков труб при величине комплекса $Gr \cdot Pr^{2,75}/Re^2 \leq 12$;

- сформулировано представление об "идеальном" генераторе озона, позволившее выявить критические параметры и разработать на этой основе конструкцию промышленного генератора озона с предельно низкими массогабаритными показателями и более низкими затратами электроэнергии на получение одного килограмма озона.

Научная новизна работы подтверждена семью патентами РФ.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

1. Впервые в отечественной практике на крупнотоннажном ожижителе водорода (агрегат 501М-1) реализован разработанный процесс политермической орто-параконверсии в интервале температур от 63 до 34 К при этом была достигнута проектная производительность ожижителя водорода, что обеспечило выполнение программы "Энергия-Буран".

2. Создана уникальная промышленная криогенная система охлаждения кислорода с комплексным использованием криогенных продуктов, высокой надежностью и малым энергопотреблением, включающая аппарат непрерывного охлаждения кислорода, которая позволила обеспечить заправку космического корабля "Буран" жидким кислородом с температурой близкой к температуре тройной точки (57 К).

3. Разработаны и исследованы пластинчатые электроды генератора озона, не имеющие аналогов, обеспечивающие высокую степень эквидистантности разрядного промежутка длиной 0,5 мм, имеющие двусторонний диэлектрический барьер и двустороннее охлаждение. Пластинчатые электроды использованы при разработке уникального генератора озона производительностью 25 кг озона в час, установленного на Восточной водопроводной станции (г. Москва) для целей очистки питьевой воды.

Достоверность результатов исследований обеспечивалась:

- применением аттестованных измерительных средств и апробированных методик измерения;
- хорошей повторяемостью полученных результатов измерений;
- соответствием полученных экспериментальных данных результатам

расчетов;

- промышленными испытаниями и эксплуатацией созданного оборудования.

На защиту выносятся:

- теоретические и экспериментальные исследования процесса орто-параконверсии в аппаратах адиабатического, изотермического и политермического типа; результаты исследований при различных методах его реализации с получением локальных данных о характере распределения температур и содержания параформы;
- результаты реализации процесса орто-параконверсии на температурном уровне от 63 до 34 К в режиме политермической конверсии на крупнотоннажном ожижителе водорода 501М-1;
- способ охлаждения жидкого кислорода до температуры близкой к температуре тройной точки по схеме комбинированного охлаждения;
- экспериментальные данные по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению при течении в межтрубном пространстве теплообменника воды и жидкого кислорода в условиях фазового перехода на поверхности теплообмена;
- результаты исследования гидродинамической обстановки за "чистым" пучком труб: распределение температуры по высоте канала без перемешивания и с дополнительным перемешиванием потока, количественное соотношение, обеспечивающее протекание процесса теплообмена в условиях равномерного намерзания твердой фазы на поверхности теплообмена;
- результаты испытаний промышленной криогенной системы охлаждения жидкого кислорода до температуры 57 К с комплексным использованием криогенных продуктов;
- экспериментальные результаты по исследованию характеристик разработанных пластинчатых электродов генератора озона;
- экспериментальные данные, полученные на лабораторном и опытно-промышленном генераторах озона, оснащенных пластинчатыми электродами новой конструкции.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- Всесоюзной конференции по стендовой отработке промышленных систем (Нижняя Салда, СССР, 1985);
- Всесоюзной научной конференции "Научно-технические проблемы и достижения в криогенной технике" "Криогеника-87" (Москва, СССР, 1987);
- IV Всесоюзной конференции Электрические методы и средства измерения температуры "Электрометрия-88" (Луцк, СССР, 1988);
- Международной научно-практической конференции "Криогенная техника науке и производству" "Криогеника-91" (Москва, РФ, 1991);

- II-ом Минском международном форуме по тепло-массообмену (Минск, 1992);
- 1-ой Международной авиакосмической конференции "Человек - Земля - Космос" (Москва, РФ, 1992);
- Международной Академии холода. Секция "Криогенная техника" (Москва, РФ, 1995);
- 45-ой Всемирной выставке изобретений, исследований и новых промышленных разработок "BRUSSELS EUREKA-96";
- Международной конференции по производству и применению озона для питьевых и сточных вод "ECWATECH-98" (Москва, РФ, 1998);
- V Симпозиуме "Электротехника-2010" (Московская область, РФ, 1999);
- Международном форуме "Энергетика и общество-2000" (Москва, РФ, 2000);
- V Международном салоне промышленной собственности. Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки "Архимед-2002" (Москва, 2002);
- VII Симпозиуме "Электротехника 2010 год" (Московская область, РФ, 2003).

Личный вклад автора заключается в проведении теоретических и экспериментальных исследований, в разработке конструкции аппаратов для реализации процесса орто-параконверсии, теплообменника для охлаждения жидкого кислорода до температуры близкой к температуре тройной точки и генератора озона с пластинчатыми электродами и внедрении этих аппаратов в промышленные установки.

Все вошедшие в диссертационную работу результаты получены лично автором либо при его непосредственном участии. Работы, по материалам которых написаны разделы 2.3-2.4, 3.1-3.2, 4.3 выполнены с соавторами (А.М. Архаров, А.Л. Шуяков, В.Ю. Семенов, М.М. Пашин).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 36 печатных работ, в том числе 2 книги и 7 патентов РФ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, списка использованной литературы из 130 наименований. Работа изложена на 298 страницах машинописного текста, содержит 119 рисунков, 33 таблицы и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В первой главе сделан краткий обзор работ отечественных и зарубежных авторов, выполненных в области разработки аппаратов криогенной техники с химическими и фазовыми переходами на поверхности раздела взаимодействующих сред. Сформулированы требования к аппаратам, а также цели и задачи исследования. Приведено краткое содержание разделов диссертации.

В своих исследованиях автор опирался на работы А.М. Архарова, В.П. Белякова, Р.А. Буянова, И.И. Иоффе, А.В. Лыкова, А.И. Леонтьева, С.Н. Шорина, А.А. Гухмана, Б.С. Петухова, Н.В. Филина, В.В. Лунина, Ю.В. Филиппова, В.И. Гибалова, А. Жукаускаса, С. Вейласа, А. Форкаса, в которых рассмотрены теоретические и прикладные вопросы тепломассопереноса, орто-парапревращения водорода, охлаждения криогенных жидкостей, синтеза озона.

Вторая глава посвящена исследованию процессов орто-параконверсии при ожижении водорода.

Процесс орто-парапревращения является сложно взаимосвязанным тепломассообменным процессом и относится к классу гетерогенно-каталитических экзотермических реакций. Теплота конверсии может отводиться одновременно с проведением реакции или в последующих стадиях, соответственно процесс аппаратно осуществляется в реакторах изотермической, политермической (непрерывной) или адиабатической конверсии.

Адиабатический конвертор представляет собой аппарат емкостного типа, заполненный катализатором. Двигаясь через него, продукционный поток претерпевает орто-парапревращение. Следствием экзотермичности реакции является повышение температуры реагирующего газа, что ведет к понижению равновесной концентрации, однозначно связанной с температурой. Движущей силой процесса является неравновесность орто-парасостава. После прохождения адиабатического конвертора поток направляется в теплообменный аппарат, где отводится теплота конверсии, за счет чего достигается неравновесность, соответствующая следующему температурному уровню, после чего процесс повторяется.

Равновесная концентрация Ср является функцией температуры (рис. 1). Для рассматриваемых процессов рабочая область располагается в интервале 22 К < Т < 78 К, где линия равновесия может быть описана полиномом второй степени, а для более узкой области температур - линейной зависимостью.

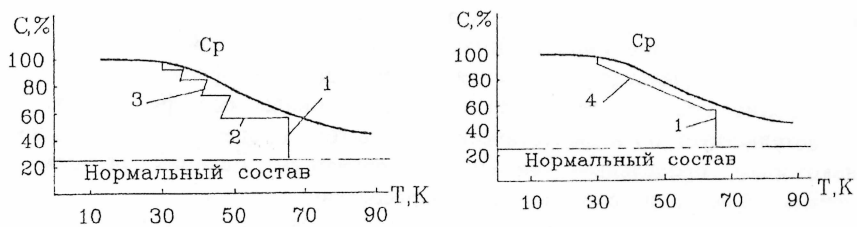

Рис. 1. Процессы изотермической (1), адиабатической (3), политермической (непрерывной) (4) орто-параконверсии и теплообмена (2)

Здесь и далее моделирование гетерогенно-каталитического процесса орто-

парапревращения проводилось при следующих допущениях: предполагалось, что процесс определяется скоростью самой химической реакции; аппарат является реактором идеального вытеснения (все элементарные объемы газа проходят через реактор за одинаковое время и претерпевают одинаковую последовательность изменения температуры, давления и концентрации), физические свойства постоянны; удельная теплота орто-параперехода постоянна; константа скорости химической реакции не зависит от температуры; катализатор является нерегулярной однородной структурой.

При сделанных допущениях процесс адиабатического орто-парапревращения и линейной аппроксимации равновесной кривой описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dC}{dV} = \dfrac{K_p}{G} \cdot (C_p - C) \\ \dfrac{dC_p}{dV} = -\dfrac{Bg \cdot K_p}{G \cdot c_T} \cdot (C_p - C) \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия:

$V = 0$; $C = C_O$; $Cp = Cp.o.$

$$C = C_o - \frac{(C_{p.o.} - C_o) \cdot c_T}{Bg + c_T} \cdot \left[\exp\left(-\frac{(Bg + c_T) \cdot K_p \cdot V}{c_T \cdot G} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

$$C_p = C_o + \frac{(C_{p.o.} - C_o) \cdot c_T}{Bg + c_T} \cdot \left[\frac{Bg}{c_T} \cdot \exp\left(-\frac{(Bg + c_T) \cdot K_p \cdot V}{c_T \cdot G} \right) + 1 \right], \quad (3)$$

где C_P - равновесная концентрация пара-формы;

C_O - начальная концентрация пара-формы;

c_T - изобарная теплоемкость реагирующего потока;

V - текущий объем катализатора;

G - массовый расход;

K_P - коэффициент скорости химической реакции;

g - удельная теплота орто-параконверсии;

B - коэффициент аппроксимации равновесной кривой;

Ср.о. - начальная равновесная концентрация пара-формы.

Решение системы представлено экспоненциальными функциями, что свидетельствует об асимптотическом характере процесса, стремящегося к некоторым предельным значениям, зависящим главным образом от начальной неравновесности по орто-парасоставу:

$$C = C_o + \frac{(C_{p.o.} - C_o) \cdot c_T}{Bg + c_T}. \quad (4)$$

Далее приводятся зависимости, учитывающие кривизну линии равновесия.

Рассматриваются особенности применения высокоактивных катализаторов, обеспечивающих эффективное протекание процесса. Моделируется процесс при переменной по длине реактора константе скорости химической реакции, рассмотрено влияние для этого случая взаимной ориентации активирующего и продукционного потоков.

Осуществлено моделирование процесса орто-парапревращения при условии отвода теплоты реакции кипящим хладагентом. Учтено взаимное влияние реакции орто-парапревращения и теплообмена. Уравнения, описывающие изменение концентрации и температуры по длине аппарата, представлены в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{dC}{d\ell} = \dfrac{K_p}{G} \cdot (A - BT - C) \\ \dfrac{dT}{d\ell} = \dfrac{g \cdot K_p}{c_T \cdot G} \cdot (A - BT - C) - \dfrac{4K}{G \cdot c_T \cdot d}(T - T_a) \end{cases}, \tag{5}$$

где A, B - коэффициент аппроксимации равновесной кривой орто-парасостава;

ℓ- текущая продольная координата реактора;

K - коэффициент теплопередачи;

T - текущая температура реагирующего потока;

T_a - температура хладагента.

Коэффициент теплопередачи K включает в себя зависящий от плотности теплового потока коэффициент теплоотдачи со стороны кипящего хладагента. С учетом последнего обстоятельства:

$$\begin{cases} \dfrac{dC}{d\ell} = \alpha \cdot (A - BT - C) \\ \dfrac{dT}{d\ell} = \beta \cdot (A - BT - C) - \gamma \cdot (\varphi T + \eta) \end{cases}. \tag{6}$$

Система имеет следующее решение:

$$T = C_1 \cdot \exp(\lambda_1 \cdot \ell) + C_2 \cdot \exp(\lambda_2 \cdot \ell) + (\eta/\varphi), \tag{7}$$

$$C = \left[\left(\alpha \cdot A + \frac{\alpha B \eta}{\varphi}\right) \cdot 1 + \frac{C_1 \cdot B \cdot \alpha}{\lambda_1} \cdot (1 - \exp(\lambda_1 \cdot \ell)) + \right.$$
$$\left. + \frac{C_2 \cdot B \cdot \alpha}{\lambda_2} \cdot (1 - \exp(\lambda_2 \cdot \ell)) + C_0\right] \cdot \exp(-\alpha \ell) \tag{8}$$

Изменение температуры T по длине аппарата, как показывает анализ уравнения (7), может иметь экстремальный характер. Координата и максимальное значение температуры реагирующего газа определяются выражениями:

$$\ell = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \ln\left(-\frac{\lambda_2 \cdot C_2}{\lambda_1 \cdot C_1}\right) \tag{9}$$

$$T_{max} = C_1 \cdot \left(-\frac{\lambda_2 \cdot C_2}{\lambda_1 \cdot C_1}\right)^{\lambda_1/(\lambda_1-\lambda_2)} + \\ + C_2 \cdot \left(-\frac{\lambda_2 \cdot C_2}{\lambda_1 \cdot C_1}\right)^{\lambda_2/(\lambda_1-\lambda_2)} - \frac{\eta}{\varphi} \tag{10}$$

Максимальная разность температур определяет максимальную плотность теплового потока, которая из условий устойчивой работы аппарата не должна превышать критического значения, ограничивающего область режима пузырькового кипения, то есть должно выполняться условие:

$$q < q_{max}$$

$$q_{max} = \frac{\alpha_1}{N + \alpha_1} \cdot \left[N \cdot (T_{max} - T_a) + M\right] \tag{11}$$

Последнее соотношение позволяет путем варьирования технологическими и конструктивными параметрами аппарата избежать попадания в кризисные области.

Рассмотрены процессы политермической конверсии. Наиболее близким к равновесному является процесс, при котором текущая концентрация параформы изменяется эквидистантно равновесной кривой. Такой характер распределения позволяет путем увеличения поверхности теплообмена и объема катализатора приблизить процесс к идеальному.

Для процесса орто-парапревращения, в котором равновесная концентрация параформы возрастает с уменьшением температуры, наилучшего приближения к равновесному можно ожидать при совмещении процесса охлаждения и реакции. Постоянная разность между текущей и равновесной концентрациями предопределяет постоянную мощность выделения теплоты орто-парапревращения, а следовательно, для ее отведения требуется постоянная разность температур, для обеспечения которой более всего пригодна противоточная схема.

Таким образом, задача по максимальному приближению процесса к равновесному сводится к организации процесса с постоянными разностями температур между прямым и обратным потоками и постоянной разностью между равновесной и текущей концентрациями пара-формы.

При моделировании этого процесса кроме ранее принятых допущений предполагалось, что линия равновесия линейна, коэффициенты теплоотдачи не зависят от температуры, радиальные градиенты температуры и концентрации отсутствуют.

Математически задачи выглядят так:

$$\begin{cases} \dfrac{dC}{d\ell} = \dfrac{K_p}{G_T} \cdot (A - BT - C) \\ \dfrac{dT_x}{d\ell} = -\dfrac{4K}{G_x c_x D} \cdot (T_T - T_x) \\ \dfrac{dT_T}{d\ell} = \dfrac{gK_p}{G_T c_T} \cdot (A - BT_T - C) - \dfrac{4K}{G_T c_T D} \cdot (T_T - T_x) \end{cases} \tag{12}$$

Краевые условия:

$\ell = 0$; $C = Co$; $T_T = T^0_T$; $\ell = L$; $T_X = T^0_X$.

В общем случае система имеет решение:

$$\begin{aligned} C &= -B\left(C_1 + \frac{K_p C_2}{K_p + G_T\lambda_2} \cdot \exp(\lambda_2 \ell) + \frac{K_p C_3}{K_p + G_T\lambda_3} \cdot \exp(\lambda_3 \ell)\right) \\ T_T &= C_1 + C_2 \cdot \exp(\lambda_2 \ell) + C_3 \cdot \exp(\lambda_3 \ell) + A/B \\ T_x &= C_1 + \frac{4K\ C_2}{4K - \lambda_2 G_x c_x D} \cdot \exp(\lambda_2 \ell) + \frac{4K\ C_3}{4K - \lambda_3 G_x c_x D} \cdot \exp(\lambda_3 \ell) + A/B \end{aligned} \tag{13}$$

Как видно, процесс в общем случае имеет весьма сложный характер, зависящий от параметров и краевых условий. Кроме того, наличие в решении экспонент с различными знаками предполагает возможность экстремального изменения температуры реагирующего газа. На рис. 2 приведены изменения температур и концентраций по длине аппарата при различных соотношениях конструктивных и технологических параметров. Из анализа характеристического уравнения следует, что существует определенное соотношение между прямым и обратным потоками, а именно:

$$G_x = \frac{(Bg + C_T) \cdot G_T c_T}{c_x}, \tag{14}$$

коэффициент при линейном члене обращается в ноль, что приводит к появлению линейного слагаемого в решении системы:

$$\begin{aligned} C &= \frac{-B \cdot C_1}{1 + (G_T\lambda_3)/K_p} \cdot \exp(\lambda_3 \ell) + C_2\left(\frac{G_T}{K_p} - \ell\right) - B \cdot C_3 \\ T_T &= C_1 \cdot \exp(\lambda_3 \ell) + C_2 \ell + C_3 + A/B \\ T_x &= \frac{C_1 \cdot \exp(\lambda_3 \ell)}{1 - ((Bg + c_T) G_T D \lambda_3)/4K} + C_2\left(1 + \frac{G_x c_x D}{4K}\right) + C_3 + A/B \end{aligned} \tag{15}$$

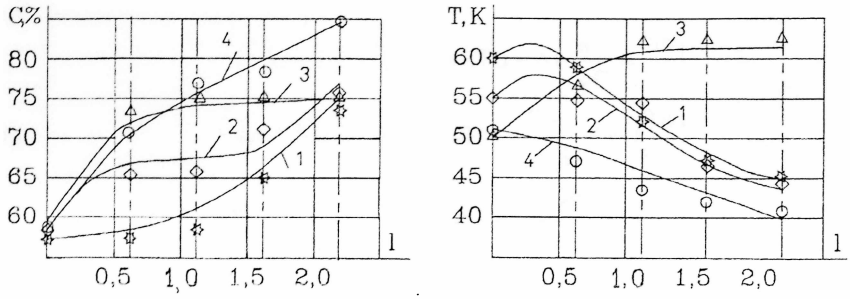

Рис. 2. Сопоставление опытных и расчетных данных:
ℓ- $\Delta C = 2{,}5$ % $\varphi = 1{,}44$ (*); 2- $\Delta C = 11{,}7$ % $\varphi = 1{,}08$ (◊);
3- $\Delta C = 26$ % $\varphi = 0$ (Δ); 4- $\Delta C = 14$ % $\varphi = 2{,}5$ (O);

Как видно из полученного результата, процесс имеет достаточно сложный характер и условие постоянной разности между текущей и равновесной концентрациями не достигается. С точки зрения физики процесса понятно, что подачей в аппарат продукта, значительно отличающегося от равновесного состава, можно вызвать тепловыделение большее, чем позволяет отвести существующая разность температур. Отсюда возникает вопрос о начальных условиях, способных обеспечить равномерное протекание процесса.

Анализ константы интегрирования C_1 приводит к выводу, что существует соотношение между начальными условиями и параметрами, обращающими ее в "О", а именно:

$$\frac{T_X^0 - T_T^0}{L + \left((Bg + c_T)\cdot G_T D\lambda_3\right)/4K} = -\frac{K_p}{B\cdot G_T}\cdot(A - BT_0 - C_0)\cdot \qquad (16)$$

Тогда решение системы описывается линейными уравнениями:

$$C = C_0 + \frac{K_p}{G_T}\cdot(A - BT_0 - C_0)\cdot\ell$$
$$T_T = T_T^0 - \frac{K_p}{B\cdot G_T}\cdot(A - BT_0 - C_0)\cdot\ell \qquad (17)$$

Таким образом, найденное решение полностью удовлетворяет поставленной задаче: найдены условия, при которых изменение текущей концентрации пара-формы всюду эквидистантно равновесной кривой, разность температур между потоками постоянна:

$$T_T - T_X = \frac{(Bg + c_T)DK_p}{4KB}\cdot(A - BT_0 - C_0)$$
$$C_p - C = A - BT_0 - C_0 \qquad (18)$$

Процесс реализуется наиболее близким к равновесному способом. Для проверки адекватности разработанных моделей реальному процессу в составе опытно-промышленной установки сжижения водорода был разработан экспериментальный аппарат-конвертор, позволивший реализовывать различные методы орто-парапревращения.

Принципиальная схема узла орто-параконверсии криогенной полупромышленной установки представлена на рисунке 3.

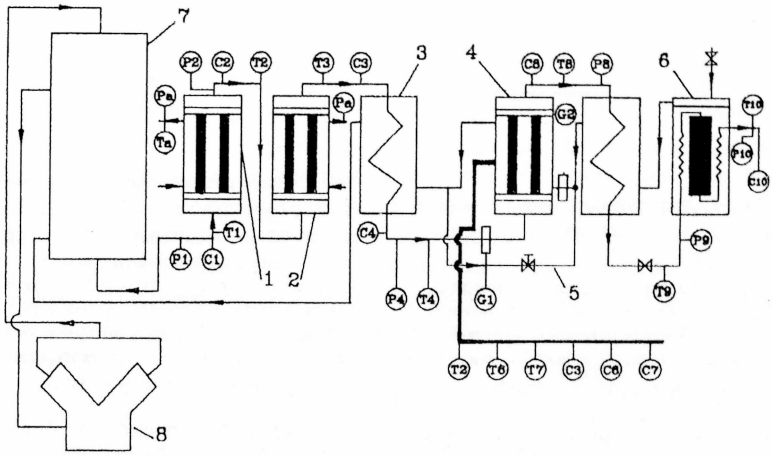

Рис. 3. Схема полупромышленной экспериментальной установки

Поток нормального водорода (с 100...250 нм^3/ч и давлением 12,0 МПа) проходил аппараты конверсии 1, 2 в изотермических условиях, затем поступал в теплообменный аппарат 3 и направлялся в опытный конвертор 4. Затем водород высокого давления дросселировался до давления 0,1...0,3 МПа и поступал в аппарат 6, где при температуре кипения жидкого водорода завершался процесс орто-парапревращения. Схема установки позволяла варьировать величину прямого и обратного потоков и их соотношения, а также температуру прямого потока на входе в аппарат.

Исследование процессов политермической и адиабатической конверсии проводилось на кожухотрубном аппарате. Количество труб - 18, диаметр 25 х 2 мм, длина 2200 мм. Трубное пространство заполнялось катализатором, межтрубное пространство для интенсификации теплоотдачи заполнялось инертной алюминиевой насадкой (рис. 4, 5).

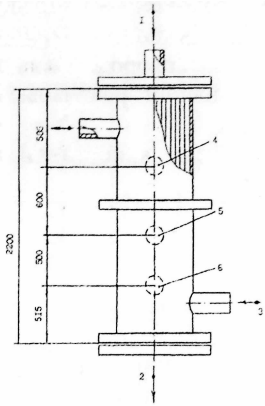

Рис. 4. Экспериментальный аппарат-конвертор:

1, 2 - вход и выход прямого потока;
3, 4 - вход и выход обратного потока;
4, 5, 6 - места установок датчиков температуры и пробоотборников

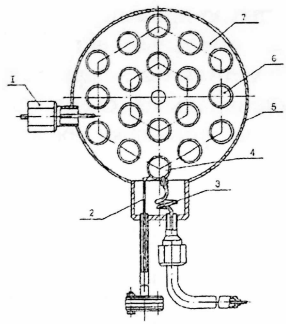

Рис. 5. Схема размещения датчиков измерения температуры прямого и обратного потоков и анализных капилляров для отбора проб орто-парасостава водорода:
1- датчик температуры ТСП 4050; 2- термопара медь-железо; 3- пробоотборный капилляр; 4- реакционная трубка; 5- обечайка; 6- места размещения катализатора; 7- место размещения алюминиевой насадки

В ходе экспериментов фиксировались значения расходов прямого и обратного потоков, а также температуры: в двух точках для аппаратов изотермической конверсии и в пяти точках для аппаратов непрерывной и адиабатической конверсии. Соответственно из двух и пяти точек производился анализ содержания орто-параводорода, фиксировались значения давления прямого и обратного потоков.

Проведенный расчетный анализ и результаты, полученные при исследовании процесса политермической орто-параконверсии в экспериментальном аппарате-конверторе (рис. 4), позволили выявить ряд факторов, влияющих решающим образом на работу аппарата непрерывной конверсии. К ним в первую очередь следует отнести соотношение расходов прямого и обратного потоков ввиду очевидного влияния этого фактора на тепловой баланс аппарата. Эффективность процесса определяет начальная величина неравновесности орто-парасостава - движущая сила процесса.

Существенно влияние "абсолютной" нагрузки, так как очевидно, что избыточная поверхность теплообмена и объем катализатора способны оказывать нивелирующие влияние на отрицательные воздействия.

Полученные результаты можно обобщить следующим образом.

- Эффективность работы конвертора зависит от соотношения прямого и обратного потоков. Двукратное соотношение обеспечивает равномерное

протекание процесса по всей длине аппарата.

- Уменьшение соотношения прямого и обратного потоков отрицательно сказывается на работе аппарата, приводя к увеличению недорекуперации и пониженным значениям концентрации пара-формы.
- Положительно влияет на ход процесса наличие 5-7 % начальной неравновесности орто-парасостава. Влияние этого фактора особенно заметно при больших нагрузках. В сочетании с указанным соотношением прямого и обратного потоков начальная неравновесность обеспечивает равномерное протекание процесса по всей длине аппарата.

Полученный экспериментальный материал хорошо согласуется с расчетными данными. Установлено, что необходимым условием приближения процесса к равновесному является соблюдение соотношения (14). Подстановка параметров, полученных из эксперимента, приводит к отношению $G_X/G_T = 2{,}2$. Именно такое соотношение потоков соответствует наиболее эффективным режимам. Эмпирически выявленная величина начальной неравновесности для исследуемого аппарата, благоприятно влияющая на ход процесса, составляет 5...7 %. Расчет по зависимости (16) приводит к величине оптимальной начальной неравновесности 5,7 %.

Исследование адиабатического режима проводилось на том же аппарате. Адиабатический режим организовывался подачей в аппарат только прямого потока водорода, в то время как обратный поток полностью отключался. Процесс изменения концентрации пара-формы и температуры реагирующего газа, как это было показано (2), (3), имеет асимптотический характер. Максимально достижимые параметры находятся в прямой зависимости от начальной концентрации пара-формы и величины исходной неравновесности. Наиболее интенсивно процесс протекает во входной части аппарата.

Экспериментальное исследование процесса изотермической конверсии проводилось на двух температурных уровнях - жидкого азота и жидкого водорода. Изотермическая конверсия с азотным охлаждением проводилось в кожухотрубном аппарате, состоящем из 37 труб с внутренним диаметром 19 мм, длиной 2,5 м, заполненных катализатором. В межтрубное пространство подавался жидкий азот. Каталитический реактор на уровне температур 22 К представлял собой вертикально расположенную трубу 168 х 4, высотой 2340 мм, заполненную катализатором и помещенную в ванну жидкого водорода.

Установлено соответствие выходных значений температур и концентраций принятым моделям. Для изотермической конверсии в жидкой фазе экспериментально установлено, что при исходной неравновесности более 12 % процесс выходит за рамки модели идеального вытеснения, что ведет к его пониженной эффективности.

На рис. 6 представлена схема модернизированного узла промышленного ожижителя водорода высокого давления - агрегат 501М-1. При его создании использовались основные результаты, полученные в настоящем исследовании. Продукционный поток перед поступлением в непрерывный конвертор предварительно охлаждался на 5...7 К по сравнению с температурой выхода из изотермического конвертора, что обеспечивало создание начальной величины неравновесности орто-парасостава. В аппарате конверсии применялся катализатор "Феррогель-1", отличающийся более простыми условиями активации и большим значением константы скорости химической реакции по сравнению с катализатором ИК-5-4. Организация рефрижераторного цикла обеспечивала необходимое соотношение прямого и обратного потоков. Процесс непрерывной конверсии проводился в кожухотрубном аппарате: количество труб - 367, длина труб -6 м, диаметр- Ф 32 х 2 мм.

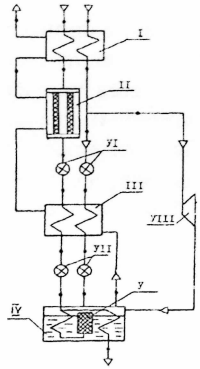

Рис. 6. Схема низкотемпературного узла ожижителя водорода 501М-1: I- теплообменный аппарат предварительного охлаждения; II- аппарат непрерывной конверсии; III- теплообменный аппарат; IV- ванна жидкого водорода; V- аппарат изотермической конверсии; VI, VII- дроссели; VIII- детандер

Таким образом, технические решения низкотемпературного узла ожижителя водорода - агрегата 501М-1 позволили добиться его устойчивой работы в расчетном режиме с получением 500 кг жидкого водорода в час, что обеспечило выполнение космической программы "Энергия-Буран".

Третья глава посвящена процессам охлаждения жидкого кислорода до температуры близкой к температуре тройной точки. Приведены результаты испытаний на модельных стендах и результаты работы системы охлаждения жидкого кислорода до температуры 57 К в составе ракетно-космического комплекса во время подготовки и запуска системы "Энергия-Буран".

Организация процесса охлаждения кислорода с помощью традиционных методов характеризуется большой энергоемкостью, наличием потерь криопродуктов или требует сложного машинного оборудования. С этой точки зрения перспективным является комбинированный способ охлаждения с комплексным использованием криогенных продуктов. Предложенный процесс охлаждения жидкого кислорода осуществляется парами водорода с температурой 16...17 К через промежуточный носитель - газообразный гелий, который циркулирует в замкнутом контуре за счет естественной конвекции. Процесс теплообмена между холодным гелием и жидким кислородом происходит в присутствии твердой фазы кислорода на поверхности теплообмена.

Изучение и визуальные наблюдения процесса образования твердой фазы

на разделительной стенке проводилось на системе вода - охлажденный воздух высокого давления. Экспериментальный стенд был выполнен в виде гидродинамического контура открытого типа. Модель представляла собой прямоугольный канал, ограниченный плоскими стенками из оргстекла и заполненный пучком трубок-цилиндров. Всего в канале сечением 130 x 80 мм размещалось три слоя по 6 цилиндров в каждом. Внешний диаметр цилиндров - 36 мм, внутренний - 6 мм, относительный шаг расположения трубок-цилиндров составляет 1,2 как в радиальном, так и в осевом направлении.

Методика проведения экспериментальных исследований включала визуализацию процесса образования льда и регистрацию следующих параметров: температур стенок трубок, температур входа и выхода хладагента, температуры входа воды, расхода воды и хладагента, вертикального профиля температуры потока воды за последним рядом трубок, гидравлического сопротивления межтрубного пространства, разности температуры теплоносителя (вход-выход). Данная методика реализовывалась при горизонтальном и при вертикальном положении экспериментального участка. Анализ полученных результатов показал, что теплоотдача в условиях образовавшегося льда определяется числом Re и температурным напором.

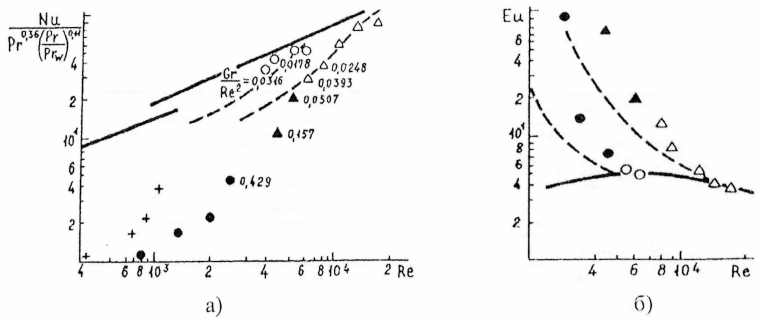

Рис. 7. Расчетные и экспериментальные данные по теплоотдаче (а) и гидравлическому сопротивлению (б):

— - зависимость А. Жукаускаса; - - - - результаты расчета; Δ, o - равномерное обмерзание; ▲, +, • - "байпасное" течение

При этом возможно существование двух принципиально различных сочетаний режимных параметров. Опытные данные для одного сочетания характеризуются незначительным отклонением от обобщенной зависимости А. Жукаускаса (рис. 7) и соответствуют равномерному обмерзанию трубок модели (рис. 8а). Другому сочетанию экспериментальных данных соответствуют режимные параметры со значительно ухудшенными теплогидравлическими характеристиками. Визуализация процесса показала, что в данном случае образуется своеобразное "байпасное" течение (рис. 8б).

1680430

МГТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

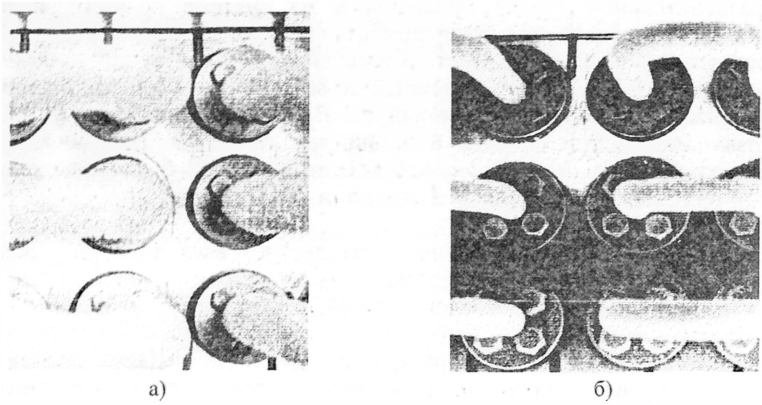

Рис. 8. Визуализация процесса образования льда: равномерное обмерзание пучка (а) и "байпасное" течение (б)

Анализ результатов измерений вертикального профиля температур потока за пучком трубок, полученных в отсутствии льда на поверхности трубок, показывает, что природа данного явления заключается в возрастающем влиянии естественной конвекции.

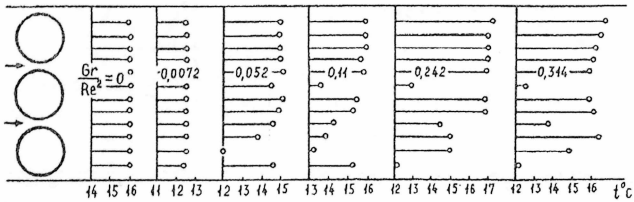

Рис. 9. Вертикальный профиль температуры за моделью теплообменника

При хорошем перемешивании потока профиль температур равномерный по высоте канала. С увеличением отношения Gr/Re^2 появляется отчетливо выраженный градиент температуры, величина которого увеличивается с увеличением отношения Gr/Re^2 (рис. 9). Такое нарушение устойчивости течения, приводящее в конечном итоге к обмерзанию нижнего слоя трубок, происходит при $Gr/Re^2 \geq 0{,}04$. Полученная величина корреспондируется с данными визуализации и характеризует границу перехода от равномерного обмерзания пучка к "байпасному" течению.

Теоретическое обоснование существования течения потока вязкой жидкости с поперечным градиентом температур оказалось возможным путем численного решения уравнений классической гидродинамики. Целью решения являлось определение поля температур и скоростей движения жидкости в межтрубном пространстве и на выходе из пучка труб.

Решалась система уравнений энергии, движения и неразрывности, записанная в отсутствии внутренних источников теплоты, с учетом зависимости плотности жидкости от температуры, а также при допущении отсутствия диссипации энергии.

Процесс решения системы уравнений сводился к построению рациональной конечно-разностной сетки и в такой постановке задача решалась с использованием прикладного пакета программ "Компасс".[1]

Анализ полученных профилей температуры показывает, что нарушение симметрии течения происходит уже после первого ряда трубок. За последующими рядами прослеживается тенденция к увеличению вертикального градиента температуры, который достигает максимума за последним рядом. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных проводилось по величине температуры жидкости за пучком трубок и показало их удовлетворительное согласование (рис. 10).

Результаты исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления при вертикальном положении экспериментального участка аналогичны опытным данным, полученным при горизонтальном положении.

Для снижения негативного влияния естественной конвекции предложена конструкция витого теплообменника с дополнительным межтрубным перемешиванием потока. Смесители-турбулизаторы располагаются в межтрубном пространстве в сечении, где скорость потока минимальна и представляет собой пространственную спираль, образованную короткими отрезками тонкой упругой проволоки, закрепленной перпендикулярно горизонтальной оси. Появление поперечного градиента температур и возникновение "байпасного" течения происходит для данной конструкции аппарата при числах $Gr/Re^2 \geq 0{,}08$, что в 2,0 - 2,5 раза выше аналогичной величины, полученной для гладких пучков.

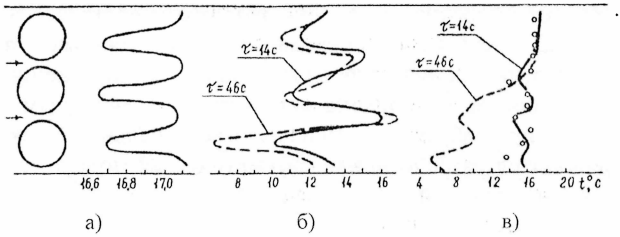

Рис. 10. Расчетные эпюры температур:
а) на последней вертикальной линии расчетной сетки перед первым рядом трубок;
б) между первым и вторым рядом трубок; в) за последним рядом трубок;
о - экспериментальные данные

[1] (Математическое моделирование процессов обтекания пучков цилиндров в ограниченной проточной части потоком вязкой несжимаемой жидкости на основе двумерных уравнений Навье-Стокса: Отчет о НИР/Центр прикладных, исследований при мех.-мат. фак. МГУ им. М.В. Ломоносова; Руковод. Г.М. Кобельков.-24с. Отв. исп. А.Г. Соколов.-М.-1990) для случая обтекания жидкостью (Pr = 7,8) "чистого" пучка при Re = 730 и $Gr = 1{,}7 \cdot 10^5$.

Далее приводятся результаты экспериментального исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления в модельных условиях на системе "жидкий кислород - гелий". Экспериментальный стенд представлял уменьшенную копию блока охлаждения реальной системы. В качестве источника холода использовалась криогенная гелиевая установка ХГУ 4000/20. Кроме нее, основное оборудование стенда включало: контур естественной циркуляции гелия высокого давления (15 МПа) с системой контроля и подпитки гелием; контур циркуляции жидкого кислорода с двумя емкостями для хранения жидкого кислорода; контрольно-измерительную аппаратуру. В теплообменное оборудование стенда входили три витых кожухотрубных теплообменника: гелий-гелий, гелий-кислород, кислород-кислород.

Работа стенда осуществлялась следующим образом: гелий высокого давления охлаждался в теплообменнике гелий-гелий потоком гелия низкого давления от ХГУ 4000/20. Естественная циркуляция гелия высокого давления устойчиво существовала за счет разности плотностей гелия и вследствие разновысокой установки теплообменников гелий-гелий, гелий-кислород (разность высот составляла 5 м). Циркуляция охлаждаемого жидкого кислорода через теплообменник кислород-кислород и гелий-кислород осуществлялась за счет "передавливания" кислорода из одной емкости в другую.

Методика проведения экспериментальных исследований включала регистрацию следующих параметров: температур стенок среднего слоя трубок, температур входа и выхода гелия и кислорода, гидравлического сопротивления межтрубного пространства модельного теплообменника, расходов жидкого кислорода и гелия низкого давления (на ХГУ 4000/20).

На рисунке 11 представлены результаты исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления межтрубного пространства модельного теплообменника. Анализ экспериментальных данных показал, что качественная картина, полученная на модельном теплообменнике при работе с жидким кислородом, аналогична результатам, полученным на визуализационной модели при работе с водой в качестве модельной жидкости.

Далее приводится разработанная математическая модель теплообменника с отложениями твердой фазы теплоносителя на границе раздела взаимодействующих сред.

Сопоставление расчетных данных, полученных на основании разработанной модели, с результатами визуализации и эксперимента показывает (рис. 11а и 11б) их хорошее согласование. Попытка описать с помощью модели равномерно обмерзшего теплообменника режима "байпасного" течения приводит к существенной погрешности. Из рисунков 11а и 11б следует, что существенное различие между расчетными и опытными данными возникает при достижении величины $Gr/Re^2 \geq 0{,}04$ для

воды, и при $Gr/Re^2 \geq 0{,}36$ для жидкого кислорода.

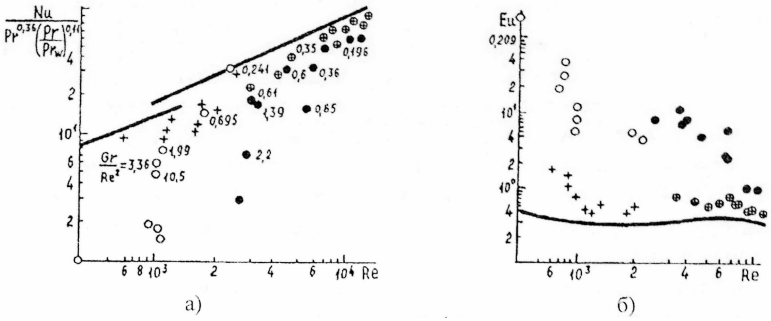

Рис. 11. Расчетные и экспериментальные данные по теплоотдаче (а) и гидравлическому сопротивлению (б) в условиях наличия льда кислорода:
—— - зависимость А. Жукаускаса; +, ⊕ - результаты расчета; o - результаты модельных испытаний; ● - результаты промышленных испытаний

После обобщения полученных данных область применения модели равномерно обмерзшего теплообменника определяется следующим неравенством:

$$\frac{Gr \cdot Pr^{2,75}}{Re^2} \leq 12, \qquad (22)$$

что позволяет сделать вывод об ее адекватности модели процессов, протекающих в реальной системе.

Результаты исследований, выполненных в модельных условиях, легли в основу создания промышленной системы охлаждения, предназначенной для заправки и термостатирования кислородных баков космического корабля "Буран" (рис. 12).

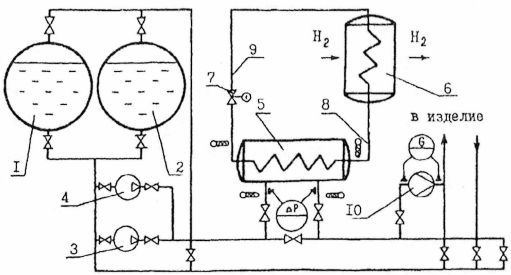

Рис. 12. Принципиальная схема системы охлаждения кислорода:
1,2 - емкости жидкого кислорода; 3,4 - центробежные насосы; 5,6 - теплообменники гелий-кислород и гелий-водород; 7 - регулирующая заслонка; 8,9 - опускная и подъемная части контура естественной циркуляции; 10 - расходомер

Далее приводятся результаты испытаний промышленной системы охлаждения кислорода.

Четвертая глава посвящена разработке, исследованию и созданию генератора озона нового поколения. Приведенные результаты исследований являются продолжением и развитием работ, начатых в МГТУ им.Н.Э.Баумана под руководством профессора Архарова А.М.

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные МГУ, МЭИ, ГУП ВЭИ, позволили сформулировать требования к "идеальному" генератору озона, обеспечивающие оптимальные условия синтеза озона из кислорода и из воздуха:

– снизить длину разрядного промежутка до величины 0,4÷0,5 мм при условии сохранения постоянства этого расстояния во всей зоне разряда, что позволяет уменьшить энергозатраты и повысить надежность работы диэлектрического барьера;

– использовать диэлектрический барьер, имеющий высокую электрическую прочность и теплопроводность, и разместить его с обеих сторон разрядного промежутка, что приводит к увеличению выхода озона с единицы поверхности электрода и повышению надежности работы барьера;

– создать интенсивный отвод теплоты от разрядного промежутка с целью предотвращения разложения озона, образующегося при разряде.

Несмотря на то, что работы в области производства генераторов озона ведутся примерно 20-25 крупными фирмами в течение нескольких десятилетий, создать генератор озона, в котором были бы выполнены все вышеперечисленные требования, не удалось. Одна из главных причин состоит в том, что доминирующей конструкцией промышленных генераторов озона является аппарат с трубчатыми высоковольтными электродами (стеклянными или металлическими), размещенными внутри металлических труб кожухотрубного теплообменника, а такая конструкция не позволяет выполнить эти требования принципиально.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, проведенные в середине 90-х годов ОАО "Криогенмаш" и ГУП ВЭИ, позволили разработать объемную тонкостенную конструкцию электрода сложной формы с использованием высокоточной штамповки тонколистовых материалов и их сварки. При выполнении этой работы был решен ряд не типовых конструктивно-технологических задач, обусловленных определенными противоречиями между высокими требованиями к точности эквидистантно-сопряженных криволинейных поверхностей смежных электродов в генераторе озона и возможностями их выполнения для габаритной полой тонкостенной конструкции электродов. За эти годы было создано пять типоразмеров электродов пластинчатого типа (таблица 1).

Исследования разработанных конструкций электродов (таблица 1) на экспериментальных и полупромышленных установках с использованием в

качестве рабочего газ кислорода показали, что можно получить максимальный выход озона с единицы поверхности электрода до 25 г/ч·дм^2 с концентрацией до 150 г/м^3. Это позволило создавать компактные конструкции генераторов озона с меньшей металлоемкостью.

Таблица 1

№ п/п	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота, мм
1.	180	45	33,0
2.	180	45	10,0
3.	370	58	40,0
4.	360	58	25,3
5.	475	78	23,0

Постановление Правительства г. Москвы № 787-РП от 08.08.2000 г. "Об организации производства отечественных озонаторных установок большой производительности для систем централизованного водоснабжения" обязывало начать работы по созданию озонаторной установки, работающей на воздухе, и системы охлаждения воды в модульно-контейнерном исполнении для систем централизованного водоснабжения г. Москвы.

Для реализации этого постановления в ОАО "Криогенмаш" был разработан промышленно-экспериментальный генератор озона, производительностью 25 кг озона в час с новой конструкцией электродов диаметром 475 мм (табл. 1). Пластинчатые электроды выполнены из двух гофрированных мембран из нержавеющей стали толщиной 0,8 мм, жестко соединённых между собой и образующих внутреннюю кольцевую полость, имеющую штуцеры входа и выхода воды. Чередующиеся высоковольтные и заземлённые электроды имеют одинаковую конфигурацию активной рабочей зоны. Принципиальная технологическая схема ГО ОВЭ-25 представлена на рис. 13.

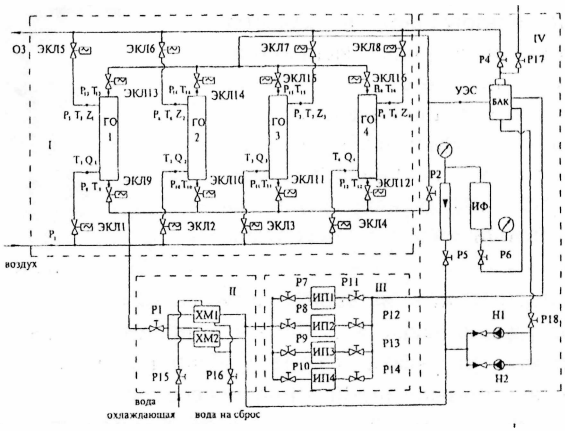

Рис. 13. Технологическая схема опытно-промышленного озонатора ОВЭ-25

Генератор озона ОВЭ-25 состоит из четырех автономных озонаторных модулей производительностью по 6,25 кг озона в час, размещенных на общей раме, на которой также крепится арматура и трубопроводы воды и воздуха (рис. 14). Каждый озонаторный модуль запитывается от источника мощностью 100 кВт (напряжение питания ~ 4 кВ, номинальная частота питающего напряжения ~ 7 кГц).

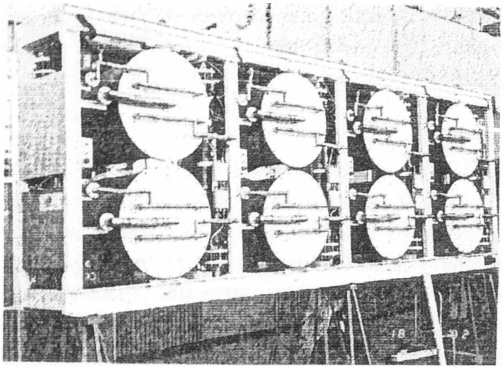

Рис. 14. Озонатор ОВЭ-25 в собранном виде перед установкой в контейнер

В состав озонаторного модуля входят два корпуса, в каждый из которых установлено по два блока электродов, по одному с каждой стороны (рис. 15).

Все блоки электродов перед их установкой в корпус генератора озона ОВЭ-25 проходили испытания на специально созданном лабораторном стенде с использованием в качестве рабочего газа кислорода. Испытания показали, что на всех 16 блоках электродов при содержании озона в смеси 80 г/м^3 достигнута проектная производительность по озону - не менее 3,15 кг/ч. При этом эффективное напряжение на электродах находилось в интервале 4,2…4,5 кВ.

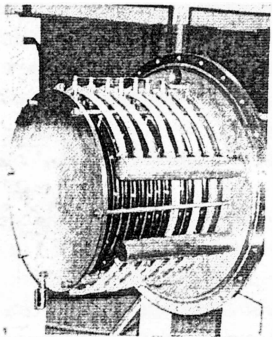

Рис. 15. Общий вид блока электродов генератора озона

Удельные энергозатраты на производство озона не превышали 8 кВт·ч/кг озона (при содержании озона 80…100 г/м^3 и производительности 3,15 кг/ч). Следует отметить, что выход озона с единицы активной поверхности электрода опытно-промышленной установки составил 16 г/ч·дм^2.

Было также подтверждено, что выход озона зависит только от величины подводимой мощности (в пределах до 150 Вт/дм^2).

Разрядное расстояние между электродами при изготовлении генератора озона ОВЭ-25 было принято равным 0,6 мм (оптимальное при работе на кислороде). Для определения влияния длины разрядного промежутка на характеристики работы генератора при использовании в качестве рабочего газа осушенного воздуха на первом модуле межэлектродное расстояние было увеличено до 0,8 мм.

В таблице 2 приведены результаты испытаний блока электродов №11 модуля №1 при работе на кислороде с разрядным расстоянием 0,6 и 0,8 мм. Как и ожидалось, характеристики работы генератора озона изменились: выход озона снизился, а энергозатраты увеличились.

В таблице 3 представлены результаты сравнительных испытаний модуля №1 при разрядном расстоянии 0,6 и 0,8 мм, выполненные практически при одинаковых условиях: давлении и расходе воздуха. Как видно из таблицы 3, характеристики работы модуля улучшились: увеличился выход озона, а энергозатраты снизились с 18,4 до 16,0 кВт·ч/кгO_3.

Таблица 2.

Разрядный промежуток, мм	V_{O2}, нм^3/ч	$T_{воды}$, ^{0}C	$U_{эфф.}$, кВ	Pd, кВт	Z, гОз/нм^3	Q, кгОз/ч	q, кВт·ч/кгОз
δ = 0,6	25,7	9	3,45	11,8	76	1,95	6,05
	25,7	9	4,00	23,2	115	2,95	7,86
	25,7	10	4,30	28,5	126	3,24	8,80
δ = 0,8	25,7	10	4,00	11,8	69	1,77	6,86
	25,7	10	4,30	17,4	89	2,28	7,63
	25,7	10	4,40	21,8	100	2,57	8,48

Таблица 3.

Разрядный промежуток, мм	$V_{возд}$, нм^3/ч	$P_{возд}$, Мпа	$U_{эфф.}$, кВ	Pd, кВт	Z, гОз/нм^3	Q, кгОз/ч	q, кВт·ч/кгОз
δ = 0,6	317	0,145	4,2	66,3	13,4	4,25	15,6
	317	0,145	4,2	72,0	14,2	4,50	16,0
	317	0,145	4,2	89,2	15,3	4,85	18,4
δ = 0,8	327	0,141	4,4	62,4	13,2	4,30	14,5
	327	0,141	4,5	77,7	14,8	4,84	15,9
	327	0,141	4,45	81,7	15,6	5,10	16,0

Следует отметить, что геометрические размеры электродов соответствуют расчетной длине разрядного промежутка равной 0,5-0,6 мм. Увеличение

этого расстояния приводит к росту величины неоднородности электрического поля в разрядном промежутке и, следовательно, к снижению эффективности работы ГО, которая в данном случае ниже, чем повышение эффективности за счет увеличения разрядного расстояния до 0,8 мм.

Производительность генератора озона также в значительной степени зависит от расхода рабочего газа (воздуха или кислорода). Результаты испытаний генератора, полученные при расходе воздуха 660 и 1750 нм^3 показывают, что выход озона увеличился с 13,0 до 24,4 кгO_3/ч, т.е. при увеличении расхода воздуха в 2,66 раза выход озона возрос в 1,87 раза.

Сопоставление характеристик генератора озона ОВЭ-25, полученных в период приемо-сдаточных испытаний, с параметрами генератора озона французской фирмы"Trailigas" HRS-850, эксплуатирующегося на Рублевской водопроводной станции (г. Москва), показывает, что при одинаковых энергозатратах ~ 15,4 кВт·ч/кгO_3 выход озона с единицы активной поверхности электрода составляет 8,1 г/ч·дм^2 (для ГО ОВЭ-25), а для HRS-850 - 0,95 г/ч·дм^2. Масса генератора озона, приведенная к производительности по озону, составляет соответственно 173 и 432 кг$_{ГО}$/кгO_3/ч.

Надежность работы генератора озона определяется в основном надежностью работы электродов, которая зависит от материала диэлектрического барьера и качества его нанесения на поверхность электрода.

Результаты испытаний озонатора ОВЭ-25 указывают на значительные преимущества металлических пластинчатых электродов с покрытием из стеклоэмали (рис. 16) по сравнению со стеклянными трубчатыми электродами как по показателям назначения, так и по надежности работы.

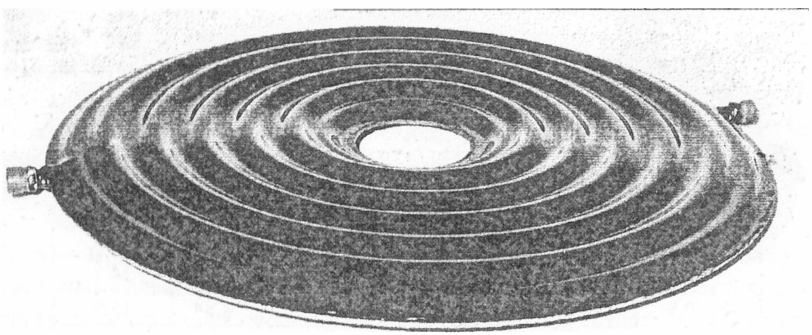

Рис. 16. Пластинчатый электрод опытно-промышленного генератора озона ОВЭ-25 производительностью 25 кг/ч

Основные результаты и выводы

1. Развита теория процесса орто-параконверсии водорода при различных способах его реализации в адиабатических, изотермических и политермических условиях применительно к работе водородных ожижительных установок. Результаты теоретических исследований положены в основу создания методов расчета аппаратов орто-параконверсии и основ проектирования сложных систем орто-параконверсии для ожижителей водорода низкого, среднего и высокого давлений в интервале температур от 68 до 24 К.

2. Впервые в полупромышленных условиях получены экспериментальные данные по локальному распределению температуры и содержанию параформы по высоте аппаратов адиабатической и политермической конверсии в потоке водорода высокого давления в реальном процессе его охлаждения в слое катализатора, которые подтвердили основные положения разработанной теории.

3. Впервые в отечественной практике на крупнотоннажном ожижителе водорода (агрегат 501М-1) реализован политермический процесс орто-парапревращения водорода в интервале температур от 63 до 34 К с использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований. Это позволило достичь проектной производительности ожижителя водорода, что обеспечило выполнение программы "Энергия-Буран".

4. Впервые в мировой практике предложен способ охлаждения кислорода до температуры близкой к температуре тройной точки гелием высокого давления, циркулирующим в замкнутом контуре и охлаждаемым потоком газообразного водорода с температурой 17 К.

5. Эффективность предложенного способа охлаждения жидкого кислорода подтверждена экспериментальными исследованиями в модельных и реальных условиях реализации процесса. Показана возможность применения зависимостей по теплообмену и гидравлическому сопротивлению для "чистых" пучков труб при расчете аппаратов-охладителей с отложениями твердой фазы на поверхности теплообмена при величине комплекса $Gr \cdot Pr^{2,75}/Re^2 \leq 12$.

6. Создана уникальная промышленная криогенная система охлаждения кислорода с комплексным использованием криогенных продуктов, высокой надежностью и малым энергопотреблением, включающая аппарат непрерывного охлаждения кислорода, которая позволила обеспечить заправку космического корабля "Буран" жидким кислородом с температурой близкой к температуре тройной точки (57 К).

7. Впервые созданы промышленные пластинчатые электроды полой тонкостенной конструкции с высокой степенью эквидистантности

разрядного промежутка сопряженных поверхностей длиной 0,5 мм, двухсторонним диэлектрическим барьером и двухсторонним охлаждением. Это позволило увеличить выход озона с единицы площади поверхности до 16 - 25 г/ч·дм^2, что на порядок выше величины удельного выхода озона существующих промышленных конструкций.

8. Впервые в отечественной и зарубежной практике озоностроения (в соответствии с постановлением Правительства г. Москвы № 787-РП от 08.08.2000 г. "Об организации производства отечественных озонаторных установок большой производительности для систем централизованного водоснабжения") создан промышленный генератор озона с использованием нетрадиционных технических решений производительностью 25 кг/ч озона при работе на воздухе, параметры которого подтвердили правильность принятых технических решений. В настоящее время генератор озона находится в опытно-промышленной эксплуатации на Восточной водопроводной станции г. Москвы.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Смородин А.И., Семенов В.Ю. Некоторые особенности работы теплообменников с поперечно-обтекаемыми пучками труб // Теплоэнергетика.-1993. -№ 4.- С. 69-72
2. Смородин А.И., Семенов В.Ю. Теплообмен в витых кожухотрубных теплообменниках, работающих в условиях образовавшейся твердой фазы теплоносителя в межтрубном пространстве//Теплоэнергетика.- 1995. - С.63-69
3. Смородин А.И., Шуяков А.Л. / Процессы орто-параконверсии в аппаратах установок ожижения водорода // Вестник МГТУ. Машиностроение. -2000.- Спец. выпуск. - С.99-111
4. Смородин А.И. / Высокочастотный генератор озона нового поколения // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2003. -№7.- С.3-6
5. Семенов В.Ю., Смородин А.И. Теплообмен в криогенных теплообменниках - охладителях с образованием в межтрубном пространстве твердой фазы кислорода//Химическое и нефтегазовое машиностроение.-1994. - №2. - С.21-24
6. Шуяков А.Л., Смородин А.И. Математическое моделирование процесса изотермической орто-параконверсии//Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1994.- №4. -С.28-31
7. Новое отечественное оборудование для внедрения экологически чистых ресурсосберегающих технологий производства целлюлозы / В.В. Шкирятов, А.Г. Ляпин, А.И. Смородин и др.//Целлюлоза. Бумага, Картон. - 1996. - №1-2. - С.25-28
8. Муратов В.М., Смородин А.И., Кончаков Н.И. / Обеспечение работоспособности гофрированных мембран генераторов озона.

// Химическое и нефтегазовое машиностроение.-1999. -№1. -С.18-21
9. Данилин В.В., Кокуркин М.П., Смородин А.И. / Высокочастотные озонаторы нового поколения//Электротехника. - 2001. -№ 9. - С.24-26
10. Семенов В.Ю., Смородин А.И., Орлов В.К. Теплообмен пучка труб в поперечном потоке жидкости, осложненный образованием твердой фазы теплоносителя // ИФЖ.-1990.-Т.58, №5.- С.742-747
11. Вансевич А.В., Смородин А.И. Анализ процесса теплообмена в криогенных аппаратах с учетом отложения твердой фазы на разделительных стенках каналов// Сб. научн. трудов ОАО "Криогенмаш".- Балашиха, 1984.- С.106-115
12. Экспериментальное исследование метрологических характеристик термопреобразователей совместно с установочными конструкциями для криогенных трубопроводов / В.В. Плотников, Р.А. Колесников, А.И. Смородин и др.// Научно-технические проблемы и достижения в криогенной технике: Сб. научн. трудов IV Всесоюзной научной конференции.- Москва, 1988.- С.147-153
13. Шуяков А.Л., Смородин А.И. Исследование орто-парапревращения в адиабатическом конверторе// Сб. научн. трудов ОАО "Криогенмаш".- Балашиха, 1991. -С.18-24
14. Смородин А.И., Шуяков А.Л. Исследование и разработка аппаратов адиабатической орто-параконверсии водородных ожижителей // Криогеника - 91: Сб. научн. трудов Международной научно-практической конференции- М., 1991 - С.44-48
15. Исследование процессов тепло- и массообмена в адиабатическом конверторе / А.Л. Шуяков, А.И. Смородин, В.А. Кирпиков и др. // II Минский международный форум по тепло- и массообмену- Минск, 1992. -С.52-54
16. Исследование и разработка эффективной системы охлаждения кислорода до температуры, близкой к температуре тройной точки / А.И. Смородин, В.Ю. Семенов, О.П. Литовка // Двигательные установки авиакосмических систем: Труды первой международной авиакосмической конференции "Человек - земля - космос"- М.,1992. - Т.4. -С.233-240
17. Шуяков А.Л., Смородин А.И. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов орто-парапревращений в водородных ожижителях // Сб. научн. трудов XV Научно-технической конференции МИХМ.- М., 1993.-С.37-39
18. Семенов В.Ю., Смородин А.И. Характерные особенности конвективной теплоотдачи на границе фазового перехода жидкость - твердое тело//ИФЖ.- 1993. - Т.64, № 5.- С.619-629
19. Смородин А.И., Шуяков А.Л. Математическое моделирование аппарата непрерывной орто-параконверсии//Сб. научн. трудов ОАО

"Криогенмаш". - Балашиха, 1994. - С.116-125
20. Смородин А.И., Фомченков А.Т., Данилин В.В. Создание эффективной озонаторной установки для новых технологий// Сб. научн. трудов ОАО "Криогенмаш". - Балашиха, 1997. - С.65-73
21. Исследование несущей способности пластинчатых электродов генератора озона./А.И. Смородин, В.М. Муратов, А.Т. Турбаивский и др.// Сб. научн. трудов ОАО "Криогенмаш". - Балашиха, 1997.- С.74-83
22. Modern industrial ozone generators with enamel covering of electrodes / L.J. Abramovich, V.V. Danilin, A.I. Smorodin// Proc. of Regional Conf. on Ozone Generation and Application to Water and Wastewater Treatment.- Moscow, 1998.-P. 437-442
23. Промышленные генераторы озона с улучшенными рабочими характеристиками/ Л.Ю. Абрамович, В.В. Данилин, А.И. Смородин и др.// Электротехника - 2010: Труды V Симпозиума. М., 1999.- Т.2.- С.170-171
24. Организация производства отечественных озонаторных установок нового поколения для систем централизованного водоснабжения / В.Н. Алексеев, Ю.М. Лужков, А.И. Смородин и др.// Электротехника - 2010: Труды V Симпозиума. - М., 2003. -Т.4.- С.157-162
25. К вопросу создания комплексной лабораторно-экспериментальной базы для отработки озонаторных установок систем централизованного водоснабжения / Ю.С. Соломонов, Н.В. Карягин, А.И. Смородин и др. // Электротехника - 2010: Труды V Симпозиума. М., 2003.- Т.4.- С.163-168
26. Разработка и испытание опытно-промышленного образца озонаторной установки в модульно-контейнерном исполнении для систем централизованного водоснабжения/В.Н. Бандалетов, Ю.В. Друганов, А.И. Смородин и др.// Электротехника - 2010: Труды V Симпозиума.- М., 2003.- Т.4.- -С.169-172
27. Современные озонаторы нового поколения/Л.Ю. Абрамович, В.В. Данилин, А.И. Смородин и др.// Электротехника - 2010: Труды V Симпозиума. - М., 2003.- Т.4.- -С.173-175
28. А.с. 1250821 СССР. Способ работы теплообменного аппарата /В.В.Вансевич, А.И.Смородин, В.Ю.Семенов (СССР).-№3427879; // Открытия. Изобретения... -1997.- Бюл.№ 30.- 17 с.
29. А.с.1733892 СССР. Теплообменник/ В.Ю. Семенов, А.И. Смородин // Открытия. Изобретения... -1992. - Бюл.№18.-5 с.
30. А.с. 1870216 СССР Тепломассообменный аппарат. / А.Л. Шуяков, В.П. Ельчинов, В.И.Друненков, В.Е. Позняк, А.И. Смородин // Открытия. Изобретения... -1993.- №5.- 9 с.
31. Патент № 2046753 (РФ) Генератор озона / В.В. Данилин, М.П. Кокуркин, М.М. Пашин, Ю.В. Горбатский, В.П. Ельчинов,

А.И. Смородин // Открытия. Изобретения... -1995.-Бюл.№ 19.-14 с.
32. Патент № 2089488 (РФ) Генератор озона / В.В. Данилин, В.Н. Антонов, М.П. Кокуркин, М.М. Пашин, А.И. Смородин, В.В. Шкирятов // Открытия. Изобретения... -1997.- Бюл.№ 25.- 10 с.
33. Патент № 2179149 (РФ) Способ получения озоногазовой смеси и устройство для его осуществления / Ю.И. Духанин, А.И. Смородин, Г.Ю. Цфасман//БИ.- 2002. -Бюл. №4. -5 с.
34. Патент № 2199487 (РФ) Система электродов генератора озона / В.В. Данилин, М.П. Кокуркин, М.М. Пашин, М.А. Семин, А.И. Смородин // БИ.-2003.- Бюл.№ 6.- 12 с.
35. Криогенные системы: В 2 т. / А.М. Архаров, В.Л. Бондаренко, А.И. Смородин и др.; Под ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина.- М.: Машиностроение, 1999.- Т.2: Основы проектирования аппаратов, установок и систем.- 720 с.
36. Cryogenic System Vol.2: Designov Apparatus, plants, systems / A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, A.I. Smorodin et al.- M.:Bauman MSTU Press, 2001. - 639 p.

Д1680430
Смородин А.И.
Создание и исследование аппаратов низкотемпературной техники с фазовыми превращениям.
2004 0-00

Д 1680430

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Подписано к печати 11.05.04
Заказ 73т объем 2 п.л. Тир. 120

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана