

На правах рукописи

Козлов Александр Валерьевич

УДК 621.59

**РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСАДОЧНЫХ КОЛОНН
УСТАНОВОК РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА.**

Специальность 05.04.03 - Машины, аппараты и процессы холодильной и
криогенной техники, системы кондициониро-
вания и жизнеобеспечения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2002

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана и Воронежском военном авиационном инженерном институте.

Научные руководители:

- кандидат технических наук,
доцент Архаров И.А.
- кандидат технических наук,
доцент Жарков А.Л.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук,
профессор Макаров А.М. ,
- кандидат технических наук
Бронштейн А.С.

Ведущая организация:

ОАО «НПО Гелиймаш»

Защита диссертации состоится «1» 07 2002 года в 14³⁰ час. на заседании диссертационного Совета Д.212.141.16 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, м-н

д-та «Энергомашиностроение».

Копия, заверенная печатью, просим

направить в библиотеку МГТУ им. Н.Э.Баумана.

00 25

должны заблаговременно известить

на имя председателя Совета.

258308



Глухов С.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкое применение продуктов разделения воздуха в черной и цветной металлургии, химической промышленности, авиации, космонавтике и сельском хозяйстве, биологии, медицине и других отраслях народного хозяйства повлекло за собой разработку и создание крупных воздухоразделительных установок (ВРУ), в основу работы которых положен процесс низкотемпературной ректификации атмосферного воздуха. Размеры ректификационных колонн, входящих в состав ВРУ определяют габариты блока разделения, энергетические затраты на производство газов и соответственно определяют стоимость получаемого продукта. И хотя за последние десятилетия учеными и конструкторами внесено много существенных изменений в технологические схемы установок и конструкции аппаратов, основным элементом ректификационных колонн ВРУ по-прежнему остаются ректификационные тарелки различных типов, дальнейшее усовершенствование которых вряд ли приведет к ощутимому возрастанию эффективности колонн ВРУ.

Значительная интенсификация процесса низкотемпературной ректификации может быть достигнута при использовании новых тепло-массообменных контактных устройств – структурных пакетных насадок, некоторые типы которых нашли применение в тепло- и хладотехнике, а также в химической промышленности.

Однако до настоящего времени массообменные и гидродинамические характеристики насадок изучены недостаточно, а рекомендации по их использованию для целей ректификации весьма немногочисленны, что обусловлено коммерческими интересами фирм изготовителей

Для разработки новых типов промышленных ректификационных колонн со структурными пакетными насадками требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований, а также тщательная проверка полученных результатов в полупромышленных аппаратах.

Цель работы: исследование рабочих характеристик ректификационной колонны со структурными пакетными гофрированными насадками (далее насадка) при ректификации атмосферного воздуха.

Задачи исследования:

- разработка и создание экспериментальной установки (ВРУ-стенда) для исследования процесса ректификации атмосферного воздуха в колоннах с различными контактными устройствами;
- разработка и создание типового ряда структурных пакетных гофрированных насадок;
- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик насадок;
- изучение влияния геометрических параметров на сопротивление сухих и орошаемых насадок, их распределительные свойства;
- экспериментальное исследование процесса массопередачи при ректификации атмосферного воздуха в колоннах с насадками;
- получение полуэмпирических коэффициентов критериальных уравнений массопередачи в ректификационных колоннах при разделении атмосферного воздуха;
- оптимизация конструкции исследуемых насадок с определением оптимальных

значений эквивалентного диаметра, геометрических параметров каналов и рабочей поверхности пластин насадки;

- разработка методики инженерного расчета промышленных ректификационных колонн для ВРУ малой производительности со структурной пакетной гофрированной насадкой.

Методы исследования. Экспериментальные исследования рабочих характеристик структурных пакетных гофрированных насадок проводились на разработанном ВРУ-стенде. Исследования проводились с применением методов гидравлики, термодинамики, массообмена, численных методов, а также экспериментальных методов с активным применением ЭВМ.

Научная новизна работы

1. Впервые исследованы гидродинамические характеристики насадок треугольного, эллиптического и круглого профилей гофрирования.
2. Исследованы массообменные характеристики колонны с насадками указанных профилей при ректификации атмосферного воздуха.
3. Получены новые критериальные зависимости для процесса массопередачи в насадках.
4. Получены рабочие параметры режимов ректификации атмосферного воздуха в колонне с насадками указанных профилей.

Практическая ценность. Разработан универсальный экспериментальный ВРУ-стенд для исследования контактных устройств ректификационных аппаратов, изготовлена и исследована насадка четырех типоразмеров. Получены опытные данные для вывода полуэмпирических критериальных уравнений, используемые для инженерных расчетов промышленных насадочных ректификационных аппаратов и разработана методика инженерного расчета ректификационных колонн с насадками для воздушоразделительных колонн (ВРУ). Разработана математическая модель для исследования распределительной способности насадки.

Реализация работы. Настоящая работа внедрена в ОАО НПО «Гелиймаш», г. Москва, при проектировании новых и модернизации уже имеющихся образцов ВРУ малой производительности. Методика инженерного расчета ректификационных насадочных колонн для ВРУ внедрена в учебном процессе кафедры Криогенные машины и установки Воронежского ВАИИ.

Апробация. Основные положения работы докладывались на 21-ой Всероссийской научно-технической конференции молодых научных сотрудников «Проблемы эксплуатации и ремонта ВВТ – составная часть военно-технической политики развития ВВС на современном этапе» в НИИЭРАТ г. Москва 1997г., на Всероссийской научной конференции «Современные методы подготовки специалистов и совершенствование систем и средств наземного обеспечения авиации» в ВВАИИ г. Воронеж 1999 г.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных результатов и выводов по работе, списка литературы (113 наименований). Работа содержит 148 страниц машинописного текста, 21 рисунок, 8 таблиц.

Во введении обоснована актуальность работы, определено общее направление исследований, показана научная и практическая важность решаемых в работе задач.

Первая глава. Состояние вопроса. Цель и задачи исследования. Выполнен анализ научных публикаций по применению насадочных контактных устройств в теплообменных аппаратах. Проведен обзор исследований гидродинамических и массообменных характеристик насадок различных типов. Представлен анализ и классификация контактных устройств ректификационных колонн.

Анализ информационных источников показал, что в нашей стране и за рубежом в настоящее время занимаются отработкой различных концепций и конструктивных решений контактных устройств в виде структурных пакетных (модульных) насадок.

На основе проведенного анализа контактных устройств и изучив различные классификации предлагается массообменные насадочные контактные устройства колонн ВРУ различать следующим образом:

- по принципу размещения в колонне: упорядоченные и неупорядоченные;
- по виду геометрической поверхности: седлообразные, спирально-винтовые, сетчатые, кольца (типа колец Рашига, Палля и т.д.) сегментные, элементные и т.д. – разновидности неупорядоченных (насыпных) насадок, трубчатые, щелевые, рулонные, пакетные – разновидности регулярных (структурных) насадок;
- по удельной поверхности массообмена: высокоплотные, среднеплотные и разреженные.

Исследования различных авторов показывают что наиболее перспективными для процессов теплообмена являются конструкции структурных насадок, которые обеспечивают минимальное сопротивление и высокую эффективность массопередачи в широком диапазоне нагрузок. Достигается это благодаря хорошей организации взаимодействия фаз на структурной насадке. Элементы насадки, расположенные в определенном порядке по всему объему выполняют роль направляющих для взаимодействующих фаз и обеспечивают их тесный контакт и хорошую турбулизацию. В колоннах со структурной насадкой жидкость распределяется по вертикальным или наклонным твердым поверхностям, образуя на них жидкостную пленку. Пар также разделяется на ряд потоков, каждый из которых при прохождении через колонну контактирует с пленкой жидкости и образует с ней общую поверхность массообмена. Таким образом, гидравлическое сопротивление колонны определяется, в основном, трением движущегося пара о поверхность стекающей пленки, поскольку отсутствуют существенные местные сопротивления. Большое свободное сечение и упорядоченное движение фаз препятствует сегрегации потоков и образованию преимущественных каналов. В результате структурная насадка обладает достаточно высокой эффективностью массопередачи и одновременно низким гидравлическим сопротивлением.

Характер движения жидкости и газа в структурной гофрированной насадке намного сложнее, чем в аппаратах пленочного типа простейшей конфигурации

(длинная трубка, плоская щель), так как вследствие малой высоты пакетов профили скоростей и концентраций жидкости и газа в большинстве случаев будут нестабилизированными, а наличие гофров приводит к дополнительной турбулизации. Важными рабочими характеристиками любого массообменного устройства, в ряде случаев имеющими определяющее значение, являются их гидравлическое сопротивление и предельные рабочие нагрузки, обусловленные влиянием газового потока на течение жидкости. На рис.1 представлены зависимости удельного гидравлического сопротивления неорошаемых контактных устройств от скорости пара.

Все без исключения авторы отмечают, что в орошаемых каналах сопротивление выше, чем в сухих. Это объясняется уменьшением сечения для прохода газа; увеличением относительной скорости газа; передачей от газа к жидкости некоторой части энергии, которая расходуется на преодоление силы тяжести; потерей энергии, обусловленной движением волн и др. Особенно заметно влияние плотности орошения на сопротивление каналов малого диаметра.

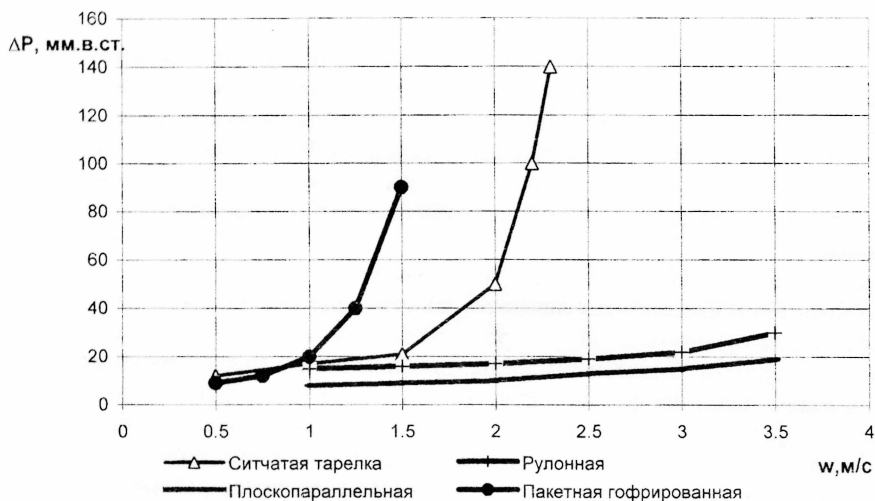


Рис.1. Зависимость удельного гидравлического сопротивления от скорости пара

В качестве способа обобщения экспериментальных данных обычно используется сопоставление сопротивлениям сухих каналов с падением давления в орошаемых. Для определения сопротивления плоскопараллельной насадки Жаворонковым Н.М. с сотрудниками предложено эмпирическое уравнение

$$\frac{\Delta P_{op}}{\Delta P_{сyx}} = \frac{500}{d_{\Sigma}^{2,15}} \cdot \Gamma + 1. \quad (1)$$

Это уравнение не учитывает физических свойств жидкости и газа и поэтому применимо только для исследованной системы вода - воздух.

При проектировании необходимо с достаточной степенью точности определять предельные нагрузки газовой и жидкой фаз, превышение которых приводит к захлебыванию колонны. Теоретическое уравнение для критической скорости движения газа при волновом течении тонкого слоя жидкости получено П.Л. Капицей:

$$\omega^{np} = \psi^{0,5} \cdot \sqrt{\frac{V_{ж} g^{0,5}}{L_{\min}}} \cdot 3,5 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ж}}{\rho_{г}}} + \omega_{ф} \cdot (2)$$

Особенно широко для расчета предельных нагрузок аппаратов с регулярными насадками используются различные модификация зависимости Бейна - Хоугена

$$\lg \left[\frac{(\omega^{np})^2 \cdot \gamma_n \cdot \mu_{ж}^{0,16}}{g \cdot d_s \cdot \gamma_{ж}} \right] = A_0 - 1,75 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_{ж}} \right)^{0,125} \cdot (3)$$

Движение газовой и жидкой фаз в регулярных насадках, состоящих из отдельных пакетов или слоев, имеет более сложный характер. Критериальные уравнения для расчета предельных нагрузок фаз в этих насадках получены либо логическим выбором на основе физической сущности процесса, либо методом анализа размерностей.

Решение задачи двухфазного тепло- и массопереноса в условиях, имеющих место в реальных аппаратах, встречает трудности, связанные с необходимостью учитывать многие факторы, характеризующие процесс: продольное и поперечное перемешивание, волнообразование, входные гидродинамические участки и т.д.

Количественные характеристики процесса массопереноса обычно определяют с помощью эмпирических формул. Опыты большинства исследователей обобщены зависимостями вида

$$Nu_y = A \cdot Re_n^m \cdot Pr_n^n \cdot (H/d_s)^p \quad (4)$$

Наличие в структурной пакетной гофрированной насадке коротких наклонных элементов, флотирование поверхности, перфорации способствует интенсификации массоотдачи как в жидкой, так и газовой фазе за счет дополнительной турбулизации и возникновения концевых эффектов. Поэтому создание методики расчета эффективности массообмена для структурных пакетных гофрированных насадок возможно лишь на основе экспериментальных данных путем получения полуэмпирических критериальных уравнений описывающих процесс массоотдачи причем эти уравнения должны быть дополнены симплексами геометрического подобия.

Обзор информационных источников показал, что данных характеризующих рабочие параметры высокоэффективных насадочных контактных устройств очень мало. Имеющиеся сведения не позволяют выполнить тепловой и конструктивный расчет ректификационной колонны воздуходелительной установки.

Основываясь на проведенном анализе научных публикаций сформулированы цель работы и задачи исследования.

Вторая глава. Экспериментальное исследование низкотемпературной ректификации воздуха в аппаратах со структурной гофрированной насадкой. Опыты в условиях низкотемпературной ректификации проведены на экспериментальном ВРУ-стенде (рис.2). Схема стенда позволяет работать в режимах $L > G$, или $L < G$,

где L и G – соответственно потоки флегмы и пара по колонне. В состав экспериментальной установки входят: ректификационная колонна высотой 1,3 м, в которой устанавливаются исследуемые контактные устройства, представляющие собой цилиндрической формы пакеты гофрированных под определенным углом пластин, сосуд для смеси компонентов воздуха подаваемой на ректификация в колонну емкостью 0,63, м³, распределительное устройство леечного типа для равномерного орошения колонны, куб колонны (испаритель емкость 0,25 м³) в котором собирается высококипящий компонент разделяемой смеси, подогреватель кубовой жидкости мощностью 2 кВт. Для ректификации воздуха в схему установки включены воздушный компрессор, блок комплексной очистки воздуха, реципиент, редуктор, азотно-воздушный конденсатор.

Опыты проводились на колоннах с четырьмя типами насадок, геометрические характеристики которых приведены в табл. 1,2 и на рис.3, 4. Рабочая среда - жидкий воздух.

Слой насадки в колонне состоит из 18 пакетов, высотой 70 мм и диаметром 96 мм, установленных друг относительно друга по высоте под определенным углом и составляет 1,26 м. Число пластин в секции зависит от геометрических размеров профиля. Секция представляет собой набор пластин, собранных в пакет и скрепленных специальным бандажом. Пластина изготавливается из рулонной фольги сплава алюминия марки АмГ-2м, толщиной 0,15 мм Бандаж представляет собой ленту, из фольги нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, длиной 105 мм и шириной 15 мм..

Для контроля концентраций смеси использовался газоанализатор и специальная программа, в основу которой положена зависимость концентрации компонентов в смеси от ее термодинамических параметров (диаграмма Герша – Цыханского), для контроля концентраций смеси подаваемой на орошения колонны, также использовались показания высокочастотного резонансного датчика параметров двухфазных потоков. Все результаты были получены при давлениях, близких к атмосферному. Наблюдение, контроль и обобщение данных полученных в результате экспериментов проводилось с помощью комплекса сбора и обработки информации, работающего под управлением специальной программы, написанной на языке BORLAND PASCAL FOR WINDOWS 7.0 и предназначена для работы в среде WINDOWS.

При проведении эксперимента на исследуемых насадках моделировались три режима работы ректификационной колонны: рабочий, устойчивый производственный режим работы при различных флегмовых отношениях, характеризующийся постепенным накоплением жидкого продукта в кубе колонны без резких изменений концентрации компонентов, расхода поступающей в куб колонны жидкости и без изменения давления по высоте колонны; режим «подвисяния» и «уноса» пленки жидкости, характеризующийся уменьшением уровня жидкого продукта в кубе колонны с одновременным повышением концентрации высококипящего компонента; режим «захлебывания», отличающийся резким возрастанием уровня жидкости в кубе колонны с одновременным уменьшением концентрации низкокипящего компонента и возрастанием давления по высоте колонны.

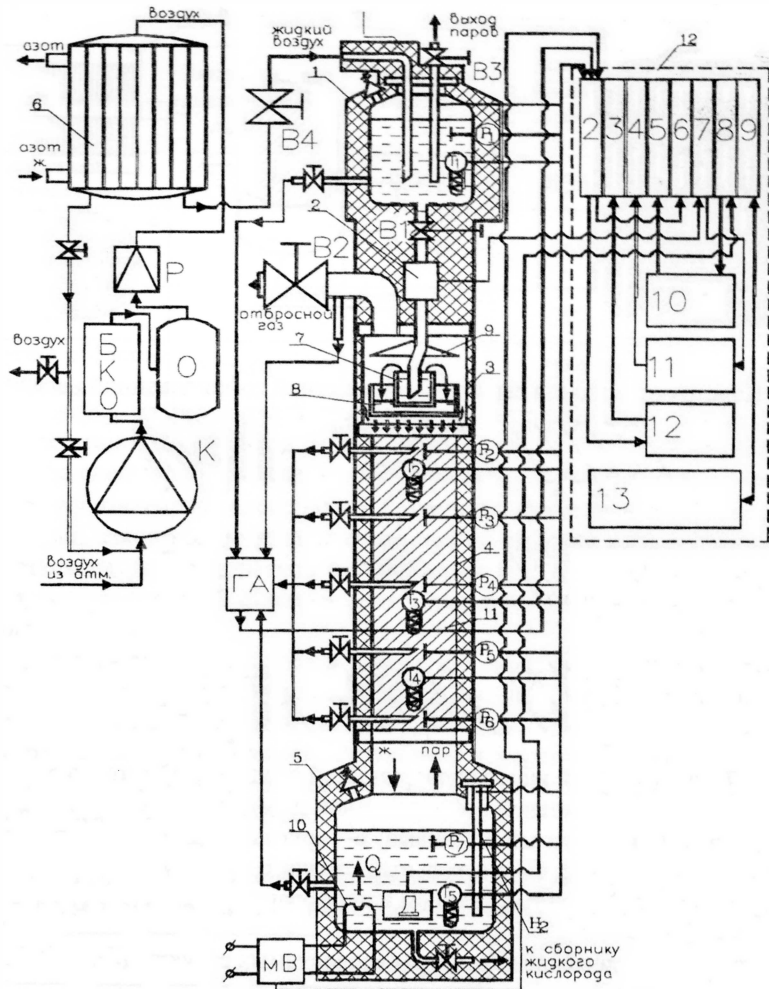


Рис.2. Функциональная схема экспериментального ВРУ-станда

1 - верхний сосуд (объем 63 л); 2 - датчик расхода жидкости; 3 - распределительное устройство; 4 - ректификационная колонна; 5 - нижний сосуд (объем 25 л); 6 - конденсатор; 7 - приемный стакан; 8 - распределитель жидкости; 9 - отбойник; 10 - нагреватель; 11 - исследуемое контактное устройство; 12 - блок обработки информации; Т1..Т5 - датчики температуры; P1..P7 - малогабаритные датчики давления; Н1,Н2 - уровнемеры (емкостные); Д - датчик диэлектрической проницаемости среды; ИМ - измеритель мощности; ГА - газоанализатор; В1..В4 - регулировочные вентили; БКО - блок комплексной очистки воздуха; К - компрессор; Р - редуктор воздушный; И - изоляция; О - реципиент.

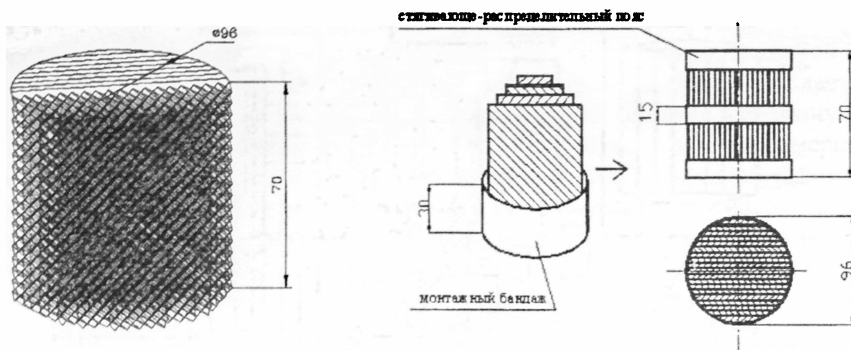


Рис.3. Конструкция пакета структурной пакетной гофрированной насадки

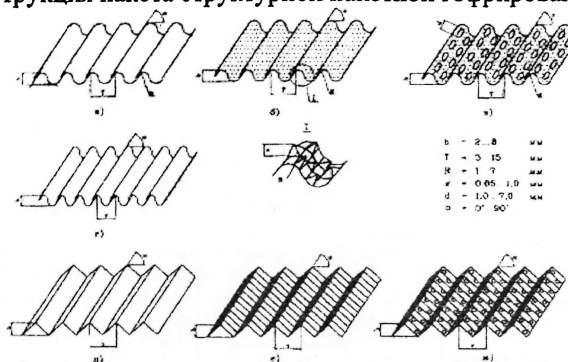


Рис.4. Типы профилей и виды поверхностей исследуемой структурной пакетной гофрированной насадки

а—круглый гладкий; б—круглый с шипами; в—круглый с шипами и отверстиями; г—параболический гладкий; д—треугольный гладкий; е—треугольный с флотированием; ж—треугольный с флотированием и перфорацией.

Таблица 1.

Основные геометрические параметры исследуемых структурных насадок

№ п/п	Тип насадки	Внешняя высота гофра В 10 ³ , м	Шаг гофра Т 10 ³ , м	Количество пластин в пакете шт.	Высота двустороннего флотирования Х 10 ³ , м	Угол γ^0 , Радиус закругления гофра R мм
1	Треугольная с флотированием	3,6	6,3	26	0,3	90
2	Треугольная с флотированием и перфорацией	3,6	6,3	26	0,3	90
3	Круглая гладкая	3,8	8,0	25	0,7	2
4	Круглая с флотированием	4,0	8,0	23	0,7	2

Таблица 2.

Основные геометрические характеристики исследуемых структурных насадок

№ п/п	Тип насадки	Эквивалентный диаметр канала $d_{экв} \cdot 10^3 \text{ м}$	Пористость насадки $\varepsilon \text{ м}^3/\text{м}^3$	Удельная площадь поверхности массообмена $S, \text{ м}^2/\text{м}^3$	Приведенная длина канала H/d_s
1	Треугольная с флотированием	5,13	0,945	736,20	246,7
2	Треугольная с флотированием и перфорацией	5,67	0,950	669,95	222
3	Круглая гладкая	4,75	0,941	792,10	265
4	Круглая с флотированием	5,01	0,944	753,30	251,5

Основываясь на результатах проведенных экспериментов можно провести сравнения всех типов насадок при работе ВРУ -стенда на производственном устойчивом режиме по следующим фиксированным параметрам: флегмовому отношению f и коэффициенту извлечения кислорода β . Результаты приведены в таблицах 3 и 4.

Поскольку закон распределения скоростей по сечению гофрированного канала на участках гидродинамической стабилизации и стабилизированного течения неизвестен, потери давления в неорошаемых насадках в работе определены экспериментально.

Замер давления производился в 5 сечениях по высоте колонны непосредственно между пакетами насадки через специальные пробоотборники, конструкция которых предотвращала попадание жидкости в газовый поток. Сопротивление насадки измерялось микроманометром. Результаты измерений показали, что при скорости движения пара $\omega_n = 0,5 \div 3 \text{ м/сек}$ сопротивление неорошаемых насадок находилось в пределах $\Delta P_{сух} = 20 \div 150 \text{ Па}$.

Таблица 3.

Сравнительная оценка рабочих параметров ректификационной колонны с исследуемыми насадками в зависимости от коэффициента извлечения O_2

Тип насадки	$\beta=70 \%$				
	f	N	ВЕР, м	$k_{п}, \text{ кмоль}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	$F, \text{ м}/\text{с}(\text{кг}/\text{м}^3)^{1/2}$
Треугольная с флотированием	1,27	5,6	0,23	0,0071	1,26
Треугольная с флотированием и перфорацией	1,58	4,3	0,29	0,010	1,51
Круглая гладкая	1,28	5,5	0,24	0,0056	1,20
Круглая с флотированием	1,25	3,2	0,39	0,0049	1,34

Сравнительная оценка рабочих параметров ректификационной колонны с исследуемыми насадками в зависимости от флегмового отношения f

Тип насадки	$f=1,0$				
	$\beta, \%$	N	БЕП, м	$k_{п},$ кмоль/с м ²	$F,$ м/с(кг/м ³) ^{1/2}
Треугольная с флотированием	15	2,92	0,47	0,0029	1,10
Треугольная с флотированием и перфорацией	8,4	1,70	0,74	0,0048	1,06
Круглая гладкая	15	2,75	0,44	0,0029	1,30
Круглая с флотированием	20	2,10	0,57	0,0038	1,50
Тип насадки	$F=1,3$				
	$\beta, \%$	N	БЕП, м	$k_{п},$ кмоль/с м ²	$F,$ м/с(кг/м ³) ^{1/2}
Треугольная с флотированием	72	5,6	0,23	0,0079	1,26
Треугольная с флотированием и перфорацией	40	1,9	0,66	0,0056	1,35
Круглая гладкая	72	5,32	0,21	0,0058	1,16
Круглая с флотированием	84	6,42	0,2	0,0062	0,84

Как известно, величина общей потери давления складывается из потерь на трение и местных потерь, обусловленных стабилизацией течения на входе и внезапным расширением потока на выходе: $\Delta P_{\text{срх}} = \left[\frac{A}{\text{Re}} \cdot \frac{H}{d_s} + B \right] \cdot \frac{\rho \omega^2}{2} \cdot (5)$

$$\text{или в критериальном виде } Eu_{\text{срх}} = \frac{a}{\text{Re}} \cdot \frac{H}{d_s} + b; (6)$$

При обработке экспериментальных данных получены уравнения для определения гидродинамической потери давления в неорошаемых гофрированных насадках:

$$Eu_{\text{срх}} = \frac{26,5}{\text{Re}} \cdot \frac{H}{d_s} + 0,21 - \text{треугольная с флотированием №1};$$

$$Eu_{\text{срх}} = \frac{33}{\text{Re}} \cdot \frac{H}{d_s} - 0,45 - \text{треугольная с флотированием и перфорацией №2};$$

$$Eu_{\text{срх}} = \frac{17,1}{\text{Re}} \cdot \frac{H}{d_s} + 0,17 - \text{круглая гладкая №3};$$

$$Eu_{\text{сyx}} = \frac{16,7}{Re} \cdot \frac{H}{d_s} + 0,88 - \text{круглая с флотированием №3.}$$

Экспериментальные данные по сопротивлению сухих структурных пакетных гофрированных насадок обрабатывались также и в виде функциональной зависимости коэффициента сопротивления трения $\lambda_{\text{сyx}}$ от критерия Рейнольдса пара $Re_{\text{п}}$. В результате математической обработки по регрессионному методу зависимости коэффициента сопротивления трением от критерия Рейнольдса выведены следующие обобщенные уравнения для исследуемых насадок:

$$\lambda = \frac{30,92}{Re} - \text{№1}; \quad \lambda = \frac{44,59}{Re} - \text{№2}; \quad \lambda = \frac{23,19}{Re} - \text{№3}; \quad \lambda = \frac{30,95}{Re} - \text{№4.}$$

График данной зависимости изображен на рис. 5.

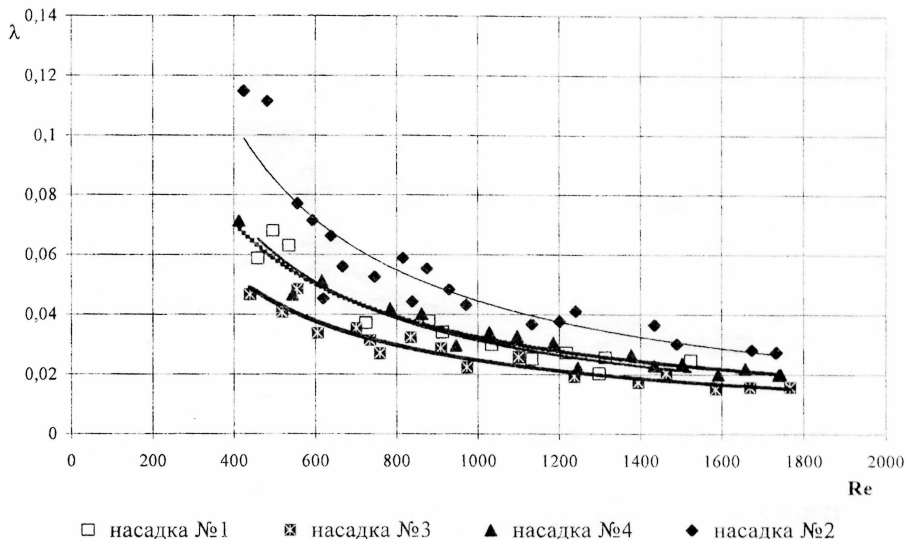


Рис. 5. Сопротивление неорошаемых насадок

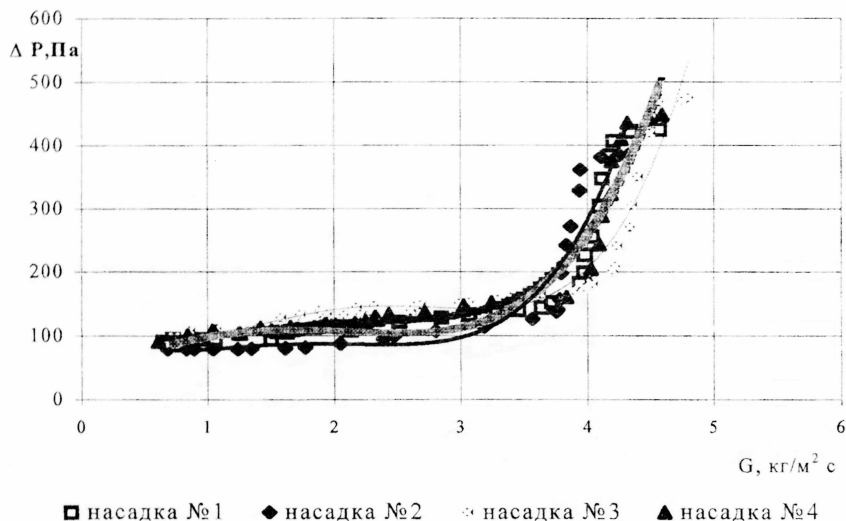
Анализ полученных результатов показывает, что местные потери давления соизмеримы с потерями на трение при установившемся движении, поэтому расчет гидравлических сопротивлений неорошаемых гофрированных насадок должен проводится с учетом местных потерь давления.

Описание двухфазных течений в каналах некруглой формы связано со значительными трудностями, обусловленными изменением толщины пленки жидкости по периметру потока. Имеющиеся в литературе эмпирические зависимости для гидравлического расчета таких каналов немногочисленны и могут быть использованы в сравнительно узких диапазонах физических свойств фаз, геометрических форм и размеров каналов.

Были установлены гидродинамические характеристики структурных пакетных гофрированных насадок при противоточном пленочном движении сжиженного

воздуха по насадке и поднимающимся по колонне паром.

На графике зависимости гидравлического сопротивления орошаемых насадок от удельных нагрузок по пару (рис.6) можно выделить несколько гидродинамических режимов, границы которых определяются точками перелома на линиях постоянной скорости пара $\omega = \text{const}$. Так, пленочный режим движения жидкости характеризуется плавным увеличением гидравлического сопротивления насадок при повышении скорости и распространяется до первой точки перелома (точка начала захлебывания). Дальнейшее увеличение нагрузки по пару приводит к резкому возрастанию гидравлического сопротивления и накоплению жидкости на насадке. Этот режим заканчивается второй точкой перелома (точка полного захлебывания), после которой колонна работает аналогично барботажной тарелке провального типа.



Рисю.6. Влияние удельной нагрузки по пару на гидравлическое сопротивление орошаемых насадок

Особенностью течения жидкости в исследуемых насадках является утолщение пленки в местах контакта гофрированных пластин, что приводит к изменению формы каналов и практически исключает возможность определения действительных сечений и скоростей движения потоков.

Особое внимание при исследовании насадок уделялось задаче определения предельных (критических) нагрузок по пару и жидкости, соответствующих раздельному противоточному движению фаз.

Для расчета предельных нагрузок использовалось корреляционное соотношение Кафарова–Дытнерского, по которому производилась обработка экспериментальных данных:

$$y = a \cdot e^{bx}, \quad (7)$$

где
$$y = \frac{w_{\text{л}}^2 \cdot a}{g \cdot F^3} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}} \cdot \mu^{0,16}; \quad x = \left(\frac{L}{G} \right)^{1,4} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{1,8}.$$

Неизвестные эмпирические значения постоянных a и b определялись графоаналитическим методом. Из рисунка 7 видно, что экспериментальные значения удовлетворительно ложатся на прямые линии описываемые уравнениями:

$$y = 0,2082 \cdot e^{-4,35 \cdot x} - \text{№1}; \quad y = 0,037 \cdot e^{-4,54 \cdot x} - \text{№2};$$

$$y = 0,137 \cdot e^{-4,42 \cdot x} - \text{№3}; \quad y = 0,613 \cdot e^{-6,18 \cdot x} - \text{№4}.$$

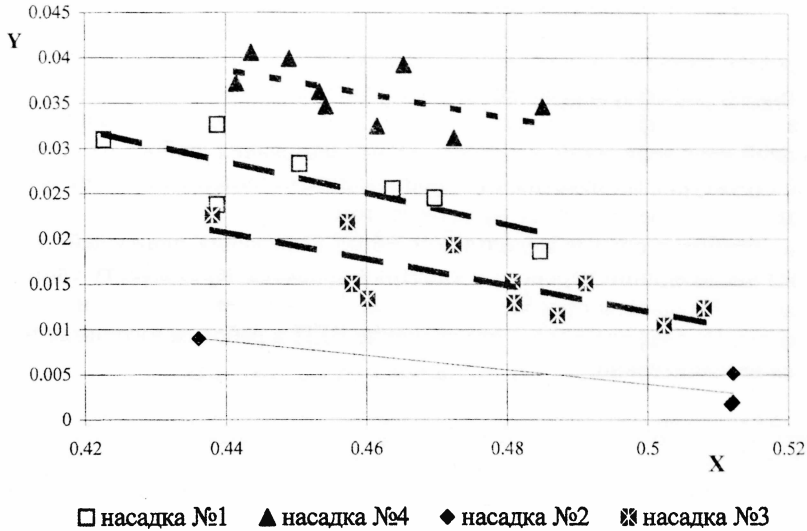


Рис.7 Определение начала режима «захлебывания» в условиях противотока пара и жидкости

Следует заметить, что, как видно из графика на скорость начала захлебывания существенно влияет геометрия насадок.

Для орошаемых насадок при рабочих скоростях пара в результате обработки экспериментальных данных для исследуемых насадок были выведены уравнения, которые можно использовать при технических расчетах:

$$\Delta P_{op} = \Delta P_{сyx} \left[1 + 5,15 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{4,40} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{\eta_{\text{ж}}}{\eta_n} \right)^{-0,33} \right] \quad \text{№1}$$

$$\Delta P_{op} = \Delta P_{сyx} \left[1 + 5,15 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{-0,82} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,80} \cdot \left(\frac{\eta_{\text{ж}}}{\eta_n} \right)^{-0,08} \right] \quad \text{№2}$$

$$\Delta P_{op} = \Delta P_{сyx} \left[1 + 5,15 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{4,86} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,60} \cdot \left(\frac{\eta_{\text{ж}}}{\eta_n} \right)^{-0,28} \right] \quad \text{№3}$$

$$\Delta P_{op} = \Delta P_{сyx} \left[1 + 5,15 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{0,55} \cdot \left(\frac{\eta_{ж}}{\eta_n} \right)^{-0,08} \right] \quad \text{№4}$$

Были исследованы также распределительные свойства насадки, влияющие на массообменные характеристики всей колонны. Разработана двумерная математическая модель процесса распределения потока вещества по слою насадки. Для оптимизации высоты, структуры и угла поворота относительно друг друга пакетов насадки использовался критерий наибольшей равномерности распределения потоков в колонне. В основе модели - расчет количества жидкости в каждом канале, образованном соседними гофрированными пластинами структурной пакетной насадки, как части от общего расхода подаваемой на насадку жидкости. Модель позволяет прогнозировать качество распределения насадки и, основываясь на этом, изменять конструктивные параметры пластин пакета структурной насадки и колонны.

Для описания процессов ректификации в аппаратах с насадками рекомендуется широкий круг уравнений, возможность использования любого из которых для колонн со структурными пакетными гофрированными насадками может быть установлен только непосредственным экспериментом.

При обработке опытов использован метод выражения движущей силы процесса через число единиц переноса и кинетики процесса через высоту единицы переноса массы. Результаты обработки опытных данных представлены на рис. 8 для паровой фазы. Из графика видно, что значение ВЕП в рабочем интервале нагрузок изменяется незначительно.

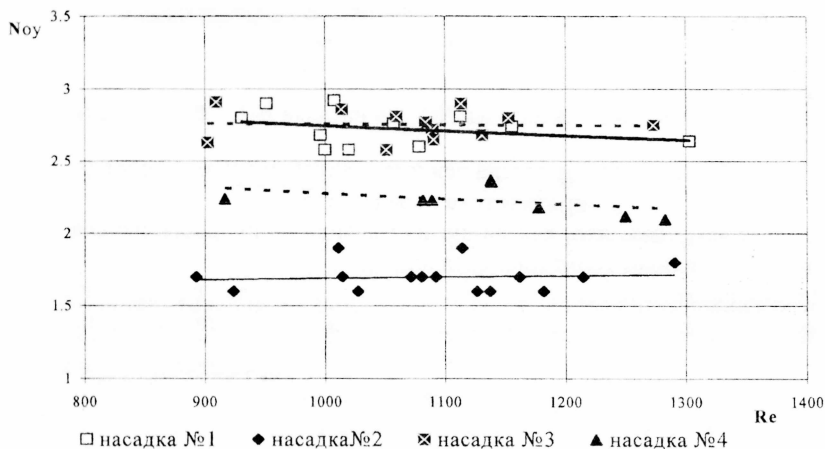


Рис. 8. Зависимость N_{oz} от критерия Re

Обобщение экспериментальных данных по ректификации усложняется из-за изменения концентраций компонентов по высоте колонн. Поэтому рабочий диапазон концентраций оказалось целесообразным разделить на n участков, в каждом из которых свойства пара и жидкости возможно считать постоянными. Тогда общая высота аппарата определится выражением

$$H_j = \sum_{i=1}^n N_{oy} h_{oy} \cdot (8)$$

Подстановкой уравнений (4) в данное для любого j, режима (j = 1, 2, 3,...,p) получим

$$H_j = \sum_{i=1}^n N_{oy} \left(A \operatorname{Re}_n^\alpha \operatorname{Pr}_n^p \left(\frac{H}{d_3} \right)^r \right) \cdot (9)$$

Обработка опытов в такой форме не требует специальных условий проведения экспериментов. Постоянные A, α, p, r вычисляются по методу наименьших квадратов на ЭВМ при помощи пакета программ Statistica для Windows. При обработке экспериментальных данных в предложенной форме на ЭВМ методом последовательных приближений определены значения констант в критериальном уравнении и получены зависимости для расчета высот единицы переноса в фазах:

$$\text{№1} - Nu_n = 3 \cdot \operatorname{Re}^{0,786} \operatorname{Pr}^{0,485} \left(\frac{H}{d_3} \right)^{-1,25};$$

$$\text{№2} - Nu_n = 1,6 \cdot \operatorname{Re}^{0,51} \operatorname{Pr}^{0,43} \left(\frac{H}{d_3} \right)^{-0,55};$$

$$\text{№3} - Nu_n = 1,7 \cdot \operatorname{Re}^{0,58} \operatorname{Pr}^{0,39} \left(\frac{H}{d_3} \right)^{-0,73};$$

$$\text{№4} - Nu_n = 1,6 \cdot \operatorname{Re}^{0,58} \operatorname{Pr}^{0,46} \left(\frac{H}{d_3} \right)^{-0,81}$$

Глава III. Ректификационная колонна со структурной гофрированной насадкой для ВРУ малой производительности. Предложена методика расчета ректификационной колонны со структурной гофрированной насадкой для ВРУ малой производительности. Проведенные исследования гидродинамических и массообменных характеристик опытных насадок, полученные критериальные уравнения и разработанная методика расчета позволили рассчитать насадочную колонну двукратной ректификации воздуха для ВРУ производительностью 100 кг/ч продукта работающую по циклу высокого давления (аналог кислородазотдобывающих станций АКДС-70М2 и ТКДС-100). Результаты расчета подтвердили предположения по уменьшению габаритных размеров ректификационной колонны ВРУ.

Проведено сравнение данных по влиянию скорости пара на эффективность массопереноса и удельное гидравлическое сопротивление в ректификационной колонне для различных контактных устройств с исследованными структурными пакетными гофрированными насадками.

Принимая в качестве критерия сравнения минимум удельного гидравлического сопротивления можно сделать следующие выводы: - наиболее перспективной, с точки зрения использования в процессах массообмена при атмосферном давлении (особенно в условиях высокой плотности орошения), является структурная пакетная насадка с косым гофром, обладающая большим диапазоном устойчивой работы, низким удельным гидравлическим сопротивлением и сравнительно высокой эффективностью; - комбинированное контактное устройство обладает наивыс-

шей эффективностью разделения и может быть перспективным при условии, когда гидравлическое сопротивление не является лимитирующим; - провальные, клапанные прямооточные и ситчатые крупнодырчатые тарелки могут обеспечить удовлетворительную работу массообменной колонны (несколько более интенсивную по сравнению с колпачковыми) при средних плотностях орошения и скоростях пара по колонне.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Созданный универсальный экспериментальный ВРУ-стенд для исследования контактных устройств ректификационных аппаратов позволяет проводить экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик насадочных контактных устройств.
2. Проведенные экспериментальные исследования процесса ректификации в аппаратах со структурными пакетными гофрированными насадками на атмосферном воздухе показали их высокую пропускную способность и эффективность.
3. Предложенная методика расчета ректификационных колонн со структурной пакетной гофрированной насадкой позволяет разрабатывать колонны с насадкой такого типа для ВРУ.
4. Предложенные полуэмпирические критериальные уравнения массопередачи, критериальные уравнения для определения потерь давления в не орошаемых структурных пакетных гофрированных насадках и уравнения для определения предельных нагрузок позволяют рассчитывать ректификационные колонны со структурной пакетной гофрированной насадкой.
5. Экспериментально установлено, что для низкотемпературной ректификации воздуха предпочтительно использовать структурные пакетные гофрированные насадки круглого профиля с $d_3 = 4,5 \div 5$ мм., имеющие лучшие показатели и отличающиеся относительной дешевизной
6. На базе проведенных исследований выявлены преимущества ректификационных колонн со структурной пакетной гофрированной насадкой в применении к ВРУ малой производительности АКДС-70М2 и ТКДС -100.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Архаров И.А., Дубинин Р.Е., Козлов А.В.. Экспериментальная установка для исследования тепломассообменных характеристик структурных насадок колонн воздуходелительных установок // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1996.- Криогенная и холодильная техника. Криомедицина: Спец. выпуск.- С.22-27.
2. Козлов А.В. Интенсификация тепломассообменных процессов с целью улучшения эксплуатационно-технических характеристик газодобывающих станций // Проблемы эксплуатации и ремонта ВВТ-составная часть военно-технической политики развития ВВС на современном этапе.: Тез. докл. 21-ой Всероссийской научнотехнической конференции молодых научных сотрудников -М., 1997.-С.54-55.
3. Козлов А.В. Анализ современных контактных устройств массообменных колонн // Сборник научных статей Воронежского ВВАИУ -1997.-Вып.15.- С.78-82.

4. Козлов А.В., Жарков А.Л. Улучшение гидродинамических характеристик ректификационной колонны – один из способов повышения эффективности ВРУ // Современные методы подготовки специалистов и совершенствование систем и средств наземного обеспечения авиации: Тез. докл. Всероссийской научной конференции –Воронеж, 1999. – С.138-140.
5. Козлов А.В., Жарков А.Л. Пленочная ректификация воздуха в аппаратах со структурной пакетной гофрированной насадкой // Совершенствование наземного обеспечения авиации :Сборник научных трудов ВВАИИ – Воронеж, 2001.–С.56-58.

Подписано в печать	29.05. 2002 г.	Формат	60х84/16
Тираж 100 экз.	Заказ 399	Объем	1 п.л.
ООО «Техполиграфцентр»	ПЛД № 53-477	Тел./ф.:	151-26-70