

На правах рукописи

Тхет Мью Аунг

**Получение концентратов стабильных изотопов водорода и кислорода
ректификацией воды в затопленном и пленочном режимах**

0.5.17.01 – Технология неорганических веществ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2018

Работа выполнена на кафедре технологии изотопов и водородной энергетики ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Научный
руководитель:

Кандидат технических наук,
Селиваненко Игорь Львович
ведущий научный сотрудник кафедры технологии
изотопов и водородной энергетики ФГБОУ ВО
«Российский химико-технологический университет имени
Д.И. Менделеева»

Официальные
оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор
Борисевич Валентин Дмитриевич
Профессор кафедры молекулярной физики ФГАОУ ВПО
Научно-исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Кандидат химических наук, профессор
Беренгартен Михаил Георгиевич
Профессор кафедры «Аппаратурное оформление и
автоматизация технологических производств»
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»

Ведущая организация: ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им.
Б.П. Константинова Национального исследовательского
центра «Курчатовский институт»

Защита диссертации состоится «26» декабря 2018 г. в 12:00 часов в конференц-зале (ауд. 443) на заседании диссертационного совета Д 212.204.05 в Российском химико-технологическом университете имени Д.И. Менделеева в адресу: 125047 Москва, Миусская пл., д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-библиотечном центре Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева и на официальном сайте <http://diss.muctr.ru/author/261/>

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

О.В. Яровая

Д 212.204.05

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Метод ректификации воды нашел широкое применение для получения концентратов стабильных изотопов водорода и кислорода, а именно конечного концентрирования дейтерия в производстве тяжелой воды из природного сырья, выделения протия из тяжелой воды тяжеловодных реакторов, получение концентрата изотопа кислород-18 (более 98 ат.%) из природного сырья, а также из отходов тяжелоокислородной воды после синтеза радиофармпрепаратов. В последние годы появились масштабные задачи получения концентрата протиевой воды, т.е. воды, очищенной от дейтерия до 100 ppm и ниже. Очищенная от дейтерия «легкая» вода нашла применение как биологически активная добавка, улучшающая метаболизм в живых организмах и снижающая риск онкологических заболеваний.

Ректификация воды обладает целым рядом таких очевидных преимуществ, как неограниченность сырьевых ресурсов, отсутствие проблем коррозии, токсичности, горючести и взрывоопасности, отсутствие расхода каких-либо химикатов, простота используемой аппаратуры.

Ввиду сравнительно малого изотопного эффекта и высокой требуемой степени разделения задача повышения пропускной способности контактных устройств и увеличение их эффективности, то есть снижения высоты теоретической ступени разделения (ВЭТС) приобретают особое значение для обеспечения конкурентоспособности процесса по сравнению с альтернативными методами.

Для ряда задач разделения колонны ректификации воды имеют небольшой диаметр, и поэтому в качестве контактных устройств в них используются нерегулярные насадки. Однако этим насадкам присущи недостатки, которые ограничивают область их применения. Это низкая пропускная способность, существенная зависимость ВЭТС от диаметра колонны, значительная материалоемкость.

Ряд этих недостатков устраняется при использовании регулярных насадок в виде рулонов, пакетов, блоков. Поэтому разработка новых контактных устройств в виде регулярных насадок, более экономичных при изготовлении, загрузке в колонну и эксплуатации является весьма актуальной.

При проектировании крупных производств большое внимание уделяется оптимизации процесса по различным параметрам, таким как время накопления, объем, а также высота разделительной аппаратуры. На все эти параметры большое влияние оказывает тип контактного устройства и эффективность массообмена на нем, которая, в свою очередь, существенно зависит от способа подготовки рабочей поверхности насадки, равномерности распределения потоков жидкости и пара в колонне, обеспечения полной смоченности поверхности контактного устройства. Поэтому поиск путей обеспечения высоких разделительных характеристик колонны и снижения затрат на подготовку насадки к работе является очень важной задачей.

В отличие от процессов концентрирования тяжелых изотопов, для процессов очистки от них единственным способом уменьшения объема и стоимости разделительных колонн является повышение эффективности массообмена (снижение ВЭТС и повышение пропускной способности насадки).

Реализованные процессы разделения изотопов водорода и кислорода осуществляются в насадочных колоннах с орошаемой насадкой, т.е. в пленочном режиме. В связи с этим очень важной задачей является обеспечение равномерности распределения жидкости на насадке. Поэтому совершенствование конструкции распределителей орошения для колонн различного диаметра является задачей, решение которой дает возможность повысить эффективность разделения.

Опыт проведения операций пуска и остановки разделительных колонн показывает, что организация пусковых операций существенно влияет на

эффективность разделения колонны в период ее эксплуатации. Поэтому выбор оптимального режима пуска колонны в работу разделения является важным фактором, определяющим дальнейшую экономичную эксплуатацию колонны.

Другим способом повышения массообмена в колоннах является использование эмульсионного режима (режима затопления). Он позволяет существенно увеличить как эффективность массообмена, так и пропускную способность насадки, так как работа ведется на скорости газа, близкой предельной. Также одним из преимуществ режима затопления является слабая зависимость эффективности массообмена от диаметра колонны. Однако, в процессах разделения изотопов ректификацией воды эмульсионный режим в насадочных колоннах ранее не использовался.

Цель работы: исследование новых высокоэффективных типов насыпных и структурированных контактных устройств для ректификации воды в пленочном и затопленном режимах, разработка комплекса мероприятий по интенсификации процесса разделения изотопов, заключающегося в усовершенствовании методик обработки поверхности контактных устройств, загрузки их в колонну, организации пускового периода.

Задачи исследования:

1. Определение влияния способа обработки поверхности на гидродинамические и массообменные характеристики насадки, выбор наиболее эффективных способов обработки.
2. Разработка новых типов насыпных и структурированных насадок и определение их гидродинамических и массообменных характеристик.
3. Оценка влияния способа проведения пусковых операций на эффективность разделения.
4. Нарботка экспериментальной базы данных по гидродинамическим и массообменным характеристикам традиционных и новых насыпных и

структурированных насадок, полученным в оптимальных условиях разделения в пленочном и эмульгационном режимах ректификации воды.

5. Сравнение эффективности массообмена и пропускной способности насадок в режиме орошения и режиме затопления для процесса ректификации воды.

6. Расчет и оптимизация установок для различных задач получения концентратов изотопов водорода и кислорода.

Научная новизна:

1. Впервые количественно изучено влияние традиционных и новых способов обработки поверхности контактных устройств на эффективность массообмена;

2. Разработаны новые типы насыпных и структурированных контактных устройств и получены их гидродинамические и массообменные характеристики;

3. Впервые наработана систематическая база данных по традиционным и новым контактным устройствам, полученная в условиях оптимального осуществления разделительного процесса;

4. Впервые проведено определение эффективности массообмена в режиме затопления для процесса ректификации воды.

Практическая значимость:

1. Выявлены способы подготовки поверхности насадок для получения концентратов изотопов водорода и кислорода ректификацией воды, позволяющие достичь максимальную эффективность разделения при минимизации затрат на проведение процесса;

2. Разработаны новые эффективные типы насыпных и структурированных контактных устройств для получения концентратов изотопов водорода и кислорода;

3. Нарботана база данных по гидродинамическим и массообменным характеристикам традиционных и новых контактных устройств для ректификации воды, позволяющая для каждой конкретной задачи получения

концентратов изотопов водорода и кислорода выбрать оптимальный тип и размер контактного устройства;

4. Показано, что использование эмульгационного режима при ректификации воды позволяет для ряда применений увеличить производительность оборудования и сократить затраты на подготовку насадки к работе;

5. Проведен расчет оптимизированных установок получения концентратов изотопов водорода и кислорода.

На защиту выносятся:

– результаты исследований по различным способам подготовки поверхности насадки для различных материалов;

– результаты технико-экономической оценки различных способов подготовки насадки;

– результаты испытаний различных способов подготовки насадки к работе;

– результаты исследования влияния распределителей орошения для различных типов насадок;

– результаты исследования работы колонны ректификации воды в режиме орошения и режиме затопления для различных видов насадок.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в постановке основных задач исследования, разработке и создании экспериментальных установок, новых типов контактных устройств, проведении исследований, обработке их результатов и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на III Международной конференции по химии и химической технологии (16-20 сентября 2013 г., г. Ереван), Конференция памяти Легасова (Москва, 2016 г.), МКХТ 2016-2017 (Москва).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 2 в научных журналах, включенных в перечень рецензируемых

научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. Общий объем работы – 115 страниц, включая 34 рисунка, 24 таблиц и библиографию из 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

Глава 1. Литературный обзор. В данной главе проведен анализ литературных данных, отражающих современное состояние работ по использованию насыпных и структурированных контактных устройств в колоннах ректификации воды при решении различных задач изотопного разделения. Рассмотрены основные параметры контактных устройств и способы их определения. Представлены гидродинамические и массообменные характеристики основных видов насадок, используемых при ректификации воды, а также проанализированы некоторые подходы к выбору контактного устройства в зависимости от типа и масштаба решаемой задачи разделения. Глава завершается выводами, в которых обосновываются актуальность и цель диссертационной работы.

Глава 2. Методика проведения экспериментов. Глава посвящена изложению экспериментальных, аналитических и расчетных методик, использовавшихся в работе. Представлены принципиальные схемы лабораторных установок с колоннами диаметром 40 – 300 мм и высотой насадочной части до 3 м, работающими как в пленочном режиме, так и с затопленным слоем насадки. В качестве примера, на рис. 1 представлена схема лабораторной установки с колонной 150 мм и высотой слоя насадки 1 м, отличительной особенностью которой является наличие устройства, для перевода колонны из пленочного режима в затопленный.

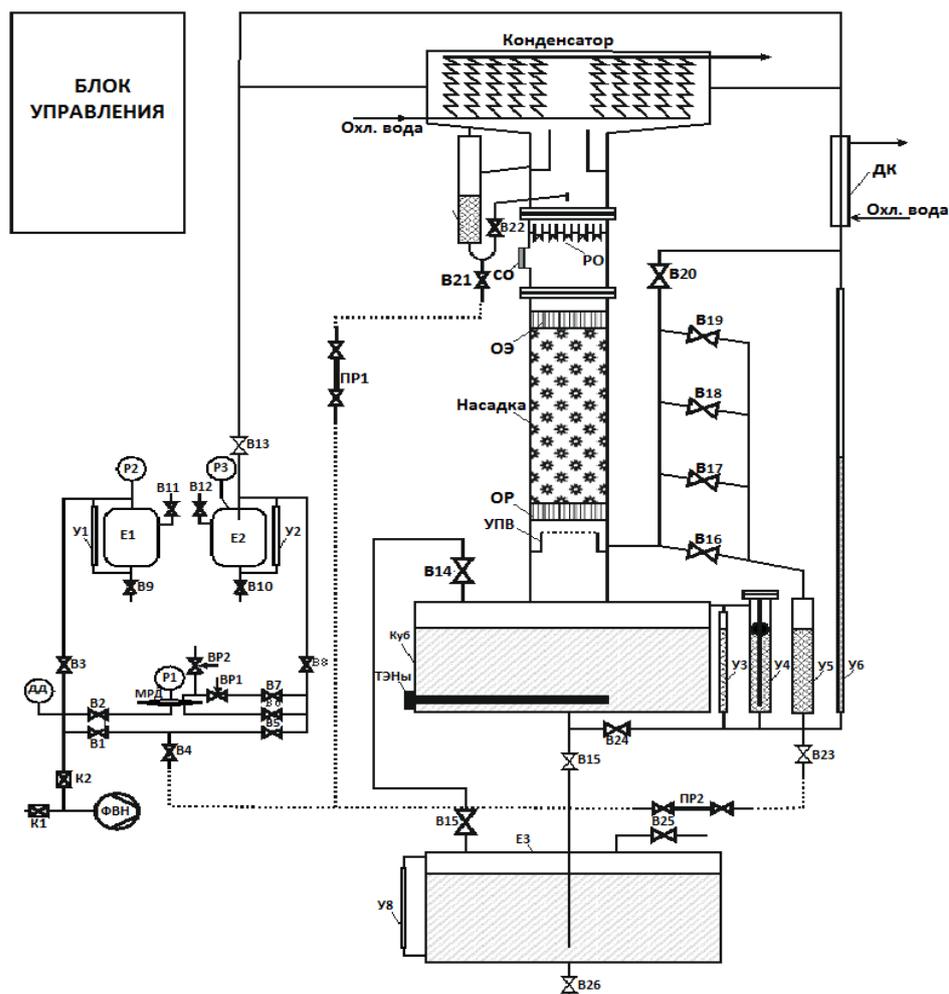


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки ректификации воды в пленочном и затопленном режимах работы насадки.

К1-магнитный клапан для напуска атмосферы; К2-клапан для отсоединения насоса от вакуума; В1 и В5-вентили байпасной линии; ДД- датчик давления; Р1-Р3-регуляторы давления, ВР1,ВР2-вентили для регулировки давления; В2-вентиль для отсечения Р1 от насоса; В3-вентиль отсекающий насос от Е1; В4-вентиль нулевого вакуума; Е1,Е2-емкости; В6,В7-вентили для отсечения Р1 от колонны; В8-вентиль для отсечения всего регулировочного узла от колонны; В9,В10-вентили слива; В11,В12-напуск атмосферы в емкости 1 и 2; У1-У7-уровнемеры; ПР1,ПР2-системы первого и второго пробоотбора; В13-вентиль отделяющий Е2 от конденсатора; В14-заливной вентиль; В15-слив; В16-В20-вентили регулирующие уровень затопления колонны; В21,В23-вентили для отбора проб; РО- распределитель орошения; ДХ- дефлегматор-холодильник; СО- смотровое окно; УПВ- устройство ввода пара.

Лабораторные исследования проводились с использованием воды природного изотопного состава с анализом по дейтерию и кислороду-18 с помощью лазерного жидкостного изотопного анализатора «Т-LWIA-45-EP», обеспечивающего погрешность измерения $\pm 0,0001$ ат. % (1 ppm).

В ходе экспериментов определяли концентрации тяжелых изотопов водорода и кислорода в жидкостных пробах из верхней (X_v) и нижней (X_n) частей колонны после вывода ее в стационарное состояние. Расчет степени разделения колонны K для области малых концентраций тяжелого изотопа проводили по формуле:

$$K = \frac{X_n}{X_v}, \quad (1)$$

Число теоретических ступеней разделения (ЧТСР) рассчитывали по уравнению Фенске для стационарного состояния колонны в безотборном режиме:

$$\text{ЧТСР} = \ln K / \ln \alpha, \quad (2)$$

где α – коэффициент разделения в системе H_2O - HDO или H_2^{16}O - H_2^{18}O .

Высоту эквивалентную теоретической ступени разделения (ВЭТС, см) рассчитывали, как отношение высоты слоя насадки (H , см) к ЧТСР:

$$\text{ВЭТС} = \frac{H}{\text{ЧТСР}} \quad (3)$$

Средняя относительная ошибка при определении ВЭТС не превышала 5 % при расчете по дейтерию и по ^{18}O .

Глава 3. Результаты работы и их обсуждение. В данной главе представлены результаты гидродинамических и массообменных испытаний известных и новых типов насыпных и структурированных насадок в колоннах различного диаметра, в зависимости от способа подготовки поверхности насадки, методики загрузки насадки в колонну и ее запуска, влияния распределения орошения и режима работы колонны – пленочного или с затопленным слоем. На рисунке 1 представлены характерные зависимости удельного гидравлического сопротивления слоя насадки СПН 3х3х0,2 от нагрузки при различном давлении.

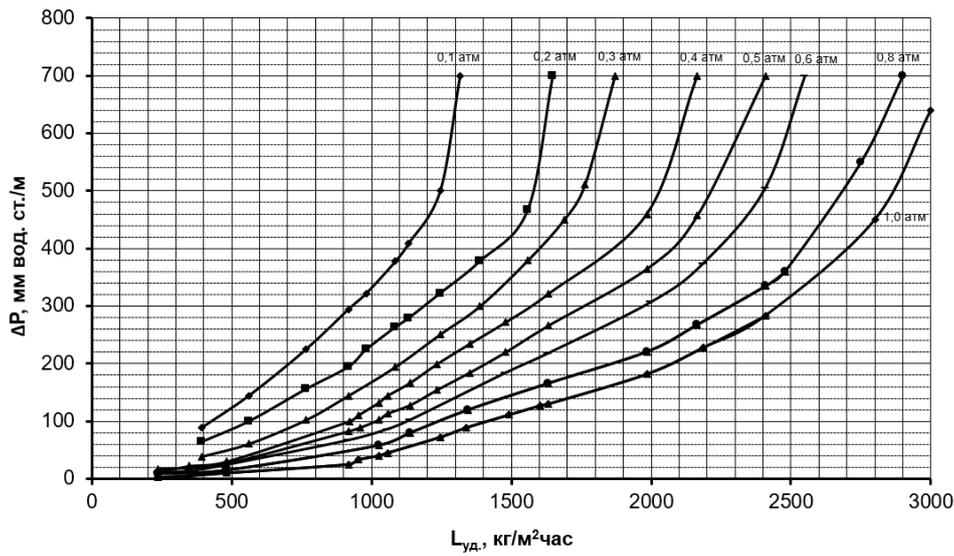


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления СПН 3x3x0,2 из AISI 321 от давления и удельной нагрузки

Такие зависимости получены для всех исследованных типов и размеров насадок. В результате обработки этих данных построены зависимости пропускной способности насадок от давления. Пример такой зависимости проведен на рисунке 2.

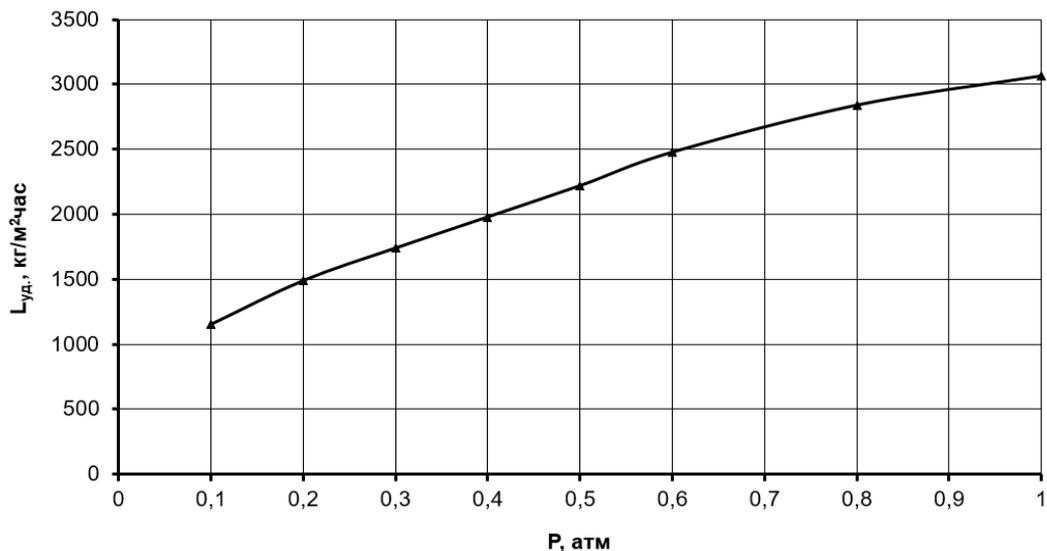


Рис. 2. Зависимость пропускной способности СПН 3x3x0,2 из AISI 321 от давления

Проводя вертикальные линии, соответствующие определенной нагрузке на графике зависимости гидравлического сопротивления слоя насадки от давления и удельной нагрузки получены графики зависимости

гидравлического сопротивления слоя насадки от давления при постоянной нагрузке. На рисунке 3, в качестве примера, приведен такой график для насадки СПН 3х3х0,2. Полученные зависимости аппроксимированы эмпирическими уравнениями.

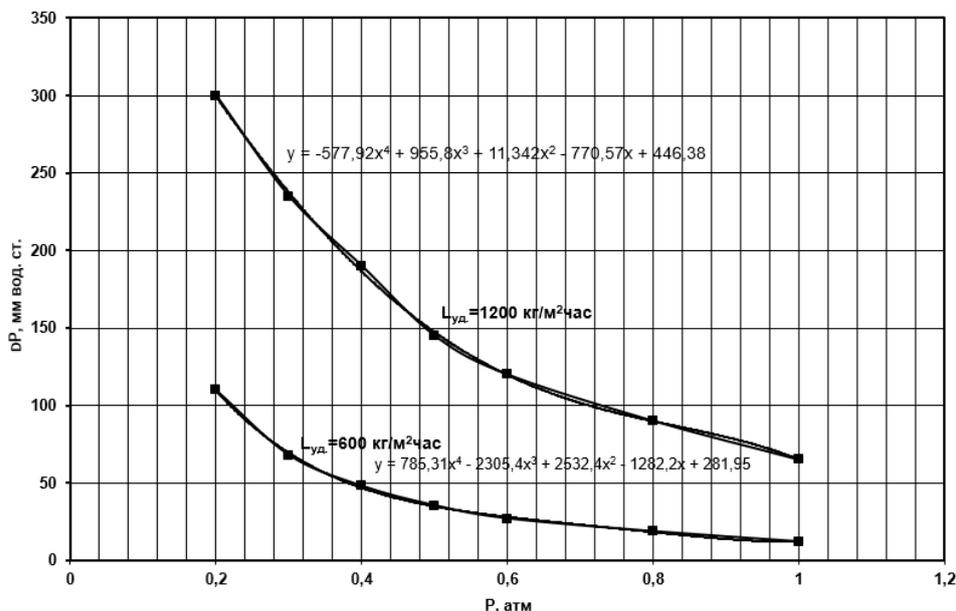


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления слоя насадки СПН 3х3х0,2 от давления при постоянной нагрузке (при 600 кг/м²*ч и при 1200 кг/м²*ч)

Полученные таким образом эмпирические уравнения могут быть использованы для расчета колонны методом от ступени к ступени и позволяют учесть изменение давления, а следовательно, и коэффициента разделения на каждой ступени.

Изучали влияние способа обработки поверхности нержавеющей, межных и алюминиевых насадок.

Показано, что при обработке поверхности нержавеющей стали высокотемпературным обжигом с последующим травлением разбавленным раствором смеси азотной и соляной кислот образуется высокоразвитая гидрофильная, не подверженная коррозии в воде поверхность, на которой достигаются наилучшие массообменные характеристики процесса получения концентратов изотопов водорода и кислорода ректификацией воды. Для медной поверхности наилучшие результаты достигнуты при обработке ее

раствором холодного чернения «Экомет-504». Также определены оптимальные условия для обработки насадки из алюминиевой проволоки.

Далее впервые количественно изучено влияние способа загрузки насадки в колонну и пускового периода на достигаемую эффективность разделения, характеризуемую высотой теоретической ступени разделения и в пленочном режиме работы контактных устройств получены зависимости гидродинамических и массообменных характеристик традиционных и новых насыпных и структурированных насадок в условиях оптимального проведения процесса разделения в экспериментальной колонне диаметром 150 мм, который является максимальным для практики изотопного разделения на насыпных насадках.

Таблица 1.

Экспериментальные значения ВЭТС для различных способов запуска
ректификационной колонны.

Способ запуска	Степень разделения колонны, К	ВЭТС, см
Способ 1	2,0	6,4
Способ 2	6,0	2,5
Способ 3	4,3	3,1
Способ 4	6,0	2,5
Способ 5	6,0	2,5
Способ 6	7,0	2,3

В этой же колонне с использованием режима эмульгирования впервые получены данные по массообменным характеристикам контактных устройств в процессе ректификации воды, см. рис. 4 – 6. Показано, что без использования сложных дорогостоящих процедур подготовки поверхности насадок в режиме эмульгирования может быть достигнута такая же эффективность массообмена, причем при более высокой пропускной способности, а, следовательно, и производительности колонны.

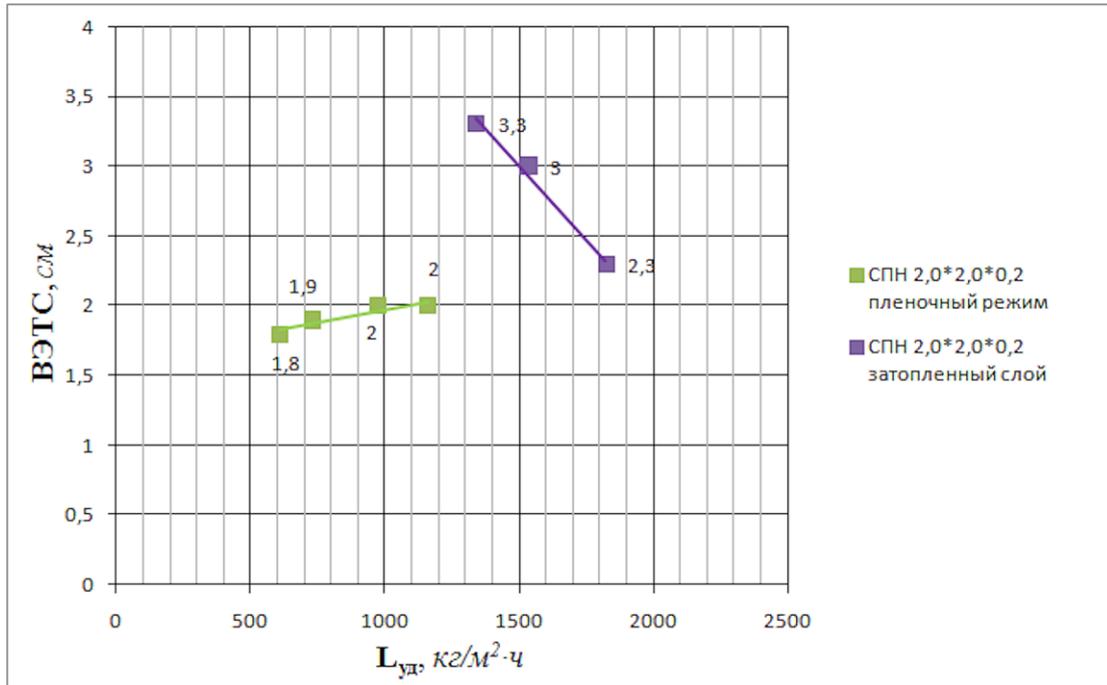


Рис. 4. Зависимость ВЭТС от нагрузки в пленочном и затопленном режимах для насадки СПН 2,0×2,0×0,2

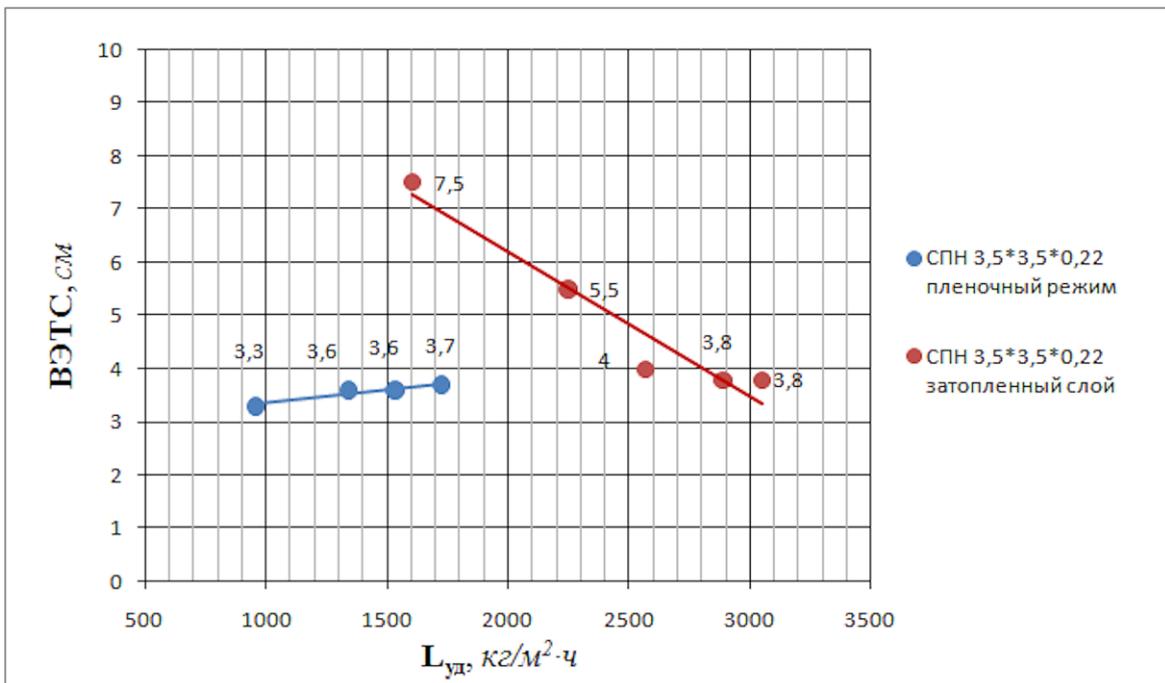


Рис. 5. Зависимость ВЭТС от нагрузки в пленочном и затопленном режимах для насадки СПН 3,5×3,5×0,2

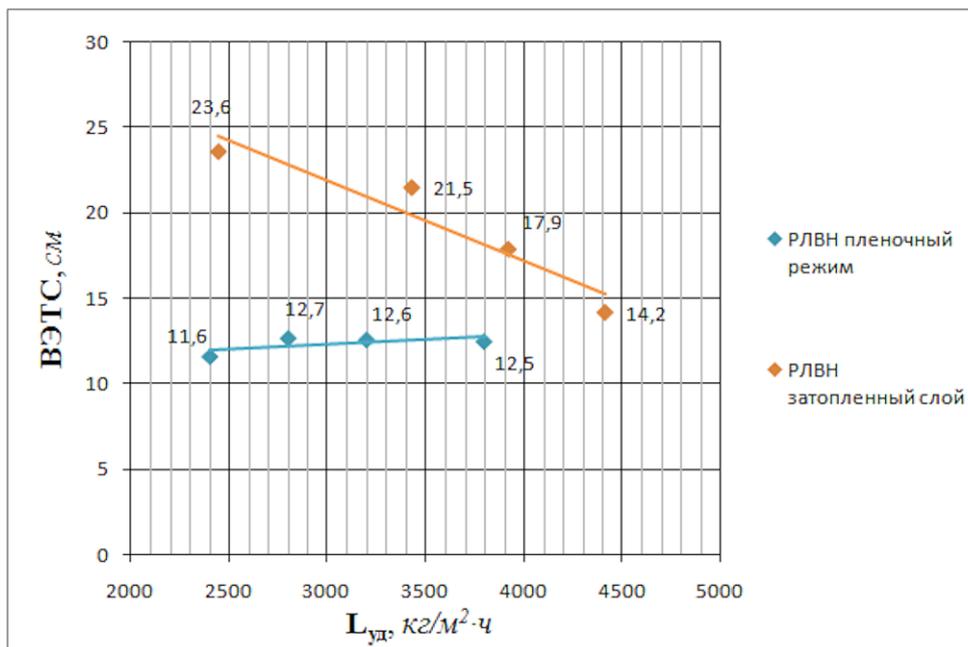


Рис. 6. Зависимость ВЭТС от нагрузки в пленочном и затопленном режимах для насадки РЛВН

Разработан критерий сравнения контактных устройств (стоимость одной теоретической ступени разделения заданной производительности), учитывающий влияние противоположно направленных факторов влияния размера элемента и условий разделения (нагрузки и давления) на пропускную способность и высоту теоретической ступени разделения, с учетом материало- и трудоемкости изготовления насадок и обработки их поверхности. Приведена таблица сравнения традиционных и новых контактных устройств по этому критерию.

Таблица 2.

Сравнение контактных устройств по критерию Kp

Насадка	$L_{уд}$, л/м ² ·ч	S (при L=100 л/ч), м ² /Dу мм	ВЭТС, см	$V_{ТСР}$, л	γ , кг/м ³	$m_{ТСР}$, кг	C, стоимость материала, руб./ТСР	T, трудоемкость, чел*ч/ТСР	Kp , руб./ТСР 100 л/ч
СПН 1,5x1,5x0,2 AISI 321	725	0,138/419	1,3	1,79	1580	2,83	1360	1,44	1648
СПН 2x2x0,2 AISI 321	860	0,116/385	1,8	2,09	1370	2,86	1373	0,9	1553
СПН 3x3x0,2 AISI 321	1500	0,067/292	2,3	1,54	930	1,43	688	0,38	764
СПН 4x4x0,25 AISI 321	1850	0,054/262	2,8	1,51	870	1,31	631	0,31	693

Продолжение таблицы 2

СПН 5x5x0,3 AISI 321	2340	0,043/ 234	4,5	1,94	876	1,70	814	0,38	890
СПН 6x6x0,4 AISI 321	2790	0,036/ 214	6,1	2,20	743	1,63	783	0,43	869
СЭН 1x3x3x0,2 AISI 321	1000	0,100/ 357	1,8	1,80	926	1,67	800	0,45	890
СЭН 1,5x4x4x0,25 AISI 321	2120	0,047 245	2,4	1,13	880	0,99	476	0,4	556
СПН 3x3x0,2 M1	1050	0,095/ 348	1,6	1,52	1060	1,61	1514	0,27	1568
СПН 6x6x0,8 Al	1800	0,056/ 267	4,6	2,58	565	1,46	1208	0,23	1254
РЛВН	3900	0,025/ 178	10,0	2,50	264	0,66	581	1,05	791
КМС 15x15	2450	0,041/ 229	10,5	4,31	180	0,77	682	8,62	2406
КМС 15x15 зубч. край	2570	0,039/ 223	11,8	4,60	175	0,81	709	10,12	2733
КМС 15x15 гофр.	3100	0,032/ 202	9,6	3,01	222	0,68	600	7,44	2088
КМС 15x15 гофр. зубч. край	2700	0,037/ 217	16	5,92	170	1,00	886	15,34	3954
КМС 15x7,5	3250	0,031/ 199	12	3,72	170	0,63	556	11,1	2776

$L_{уд}$ - удельная нагрузка при 0,2 атм, составляющая 0,8 от предельной; S - условная площадь сечения, пропускающая поток 100 л/час при нагрузке $L_{уд}$; Dy - условный диаметр колонны, пропускающей 100 л/час при нагрузке $L_{уд}$; ВЭТС - высота теоретической ступени разделения при удельной нагрузке 0,8 от предельной и давлении 0,2 атм; $V_{ТСР}$ - объем одной ТСР; γ - насыпной вес насадки; m - масса материала для производства одной ТСР; C - стоимость материала для производства одной ТСР; T - трудоемкость производства одной ТСР; Kp - критерий сравнения, представляющий собой сумму стоимости материала и трудозатрат (стоимость 1 чел*час = 200 руб.)

В четвертой главе приведены примеры реализации процессов получения концентрата изотопа кислород-18 98 ат. % из его отходов при производстве радиофармпрепаратов, дейтерия 99,96 ат. % из его отходов при синтезе дейтерированных соединений и выращивании дейтерированных кристаллов, и воды, очищенной от тяжелых изотопов водорода и кислорода из воды природного изотопного состава. Показано, что при выборе контактного устройства с использованием результатов настоящей работы, при реализации оптимальных процедур загрузки и пускового периода колонн достигается существенное снижение высоты разделительных колонн, соответствующее уменьшение капитальных затрат на оборудование и снижение себестоимости продукции.

Выводы

1. Количественно определено влияние способа обработки поверхности контактных устройств из нержавеющей стали, меди и алюминия на достигаемую эффективность разделения изотопов водорода и кислорода ректификацией воды.
2. Рекомендованы методики обработки поверхности насадок из нержавеющей стали (термообработкой в воздухе или в водяном при температуре 800°С с последующим травлением разбавленным раствором кислот), меди (холодное чернение раствором «Экомет 504») и алюминия (обработка 0,03 М раствором щелочи КОН при 65 С), позволяющие достичь наилучших кинетических характеристик (минимальное значение ВЭТС).
3. Количественно показано, что на достигаемые кинетические характеристики контактных устройств существенно влияют способ загрузки насадки и запуска колонны, и разработаны оптимальные методики осуществления этих стадий.
4. Разработаны новые типы высокоэффективных насыпных (спирально-эллиптическая насадка СЭН, модифицированные кольца Диксона) и структурированных (регулярная ленточно-винтовая насадка РЛВН) контактных устройств для получения концентратов изотопов водорода и кислорода ректификацией воды, позволяющие достичь высокую пропускную и разделительную способность
5. Экспериментально получена база данных по гидродинамическим и массообменным характеристикам новых и традиционных контактных устройств в условиях оптимального осуществления разделительного процесса
6. Установлено, что эмульгационный режим работы колонны ректификации воды для ряда применений позволяет на 20-50 % увеличить производительность процесса по сравнению с пленочным режимом при той же высоте колонны и сократить затраты на подготовку насадки к работе.
7. Предложен критерий выбора контактных устройств для получения концентратов стабильных изотопов водорода и кислорода, учитывающий материалоемкость и трудоемкость их изготовления.

8. На основе полученных результатов реализованы эффективные установки получения концентратов дейтерия и кислорода-18 из их высококонцентрированных отходов, а также установки получения воды, обогащенной легкими изотопами водорода и кислорода из природного сырья.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Тхет Мьйо Аунг, Букин А.Н., Марунич С.А., Пак Ю.С., Розенкевич М.Б., Селиваненко И.Л., Сумченко А.С. Влияние способа запуска насадочной колонны на эффективность процессов ректификации воды и детритизации газов методом фазового изотопного обмена // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т.49, № 3. С.267-276.

2. Тхет Мьйо Аунг, Селиваненко И.Л. Эффективность разделения изотопов водорода ректификацией воды в колоннах с пленочным и затопленным режимами работы насадки // Химическая промышленность сегодня. 2017. № 2. С.3-10.

3. Тхет Мьйо Аунг, Селиваненко И.Л., Селиваненко О.И. Регулярная рулонная ленточно-винтовая насадка из гофрированной сетки для массообменных колонн // III Международная конференция по химии и химической технологии: Сборник материалов. Ер: Институт общей и неорганической химии НАН РА, 2013. С.537-539.

4. Тхет Мьйо Аунг, Меланьин Ф. В., Мосеев П. С., Селиваненко И. Л., Селиваненко О. И. Влияние способа запуска колонны с регулярной насадкой из нержавеющей сетки на эффективность разделения модельной смеси протий-дейтерий методом ректификации воды // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т.28, № 9. С.16-18.

5. Тхет Мьйо Аунг, Мосеев П.С. Ректификация воды в колонне с затопленным слоем насадки // Образование и наука для устойчивого развития. Научно-практическая конференция и школа молодых ученых и студентов: материалы конференции: в 3 ч. Ч. 2. Ядерные технологии и устойчивое развитие. Зеленая химия для устойчивого развития, Москва, 19-21 апреля 2016 г. М.:РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2016. С.79-82.

6. Тхет Мьйо Аунг, Мосеев П.С. Ректификация воды в затопленном слое нерегулярных и регулярных насадок // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т.30, № 6. С.74-76.