

**ФАНО РОССИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ**  
**ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ И НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ им. Н.С. КУРНАКОВА**  
**РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**  
**(ИОНХ РАН)**

119991, г. Москва, Ленинский проспект, 31. Тел. (495) 952-0787, факс (495) 954-1279, E-mail: info@igic.ras.ru

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, член-корреспондент РАН, доктор химических наук

— В.К. Иванов

«15» марта 2017 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертацию Белкина Дмитрия Юрьевича «Изотопная очистка теплоносителя промышленного тяжеловодного реактора ЛФ-2», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.02 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов

Изотопы нашли широкое применение в различных отраслях науки и технике. Наиболее распространенный в науке и технике среди легких изотопов - дейтерий в виде тяжелой воды ( $D_2O$ ) используется на атомных энергетических станциях в тяжеловодных реакторах на тепловых нейтронах как замедлитель, а также как теплоноситель для охлаждения активной зоны реактора. В процессе эксплуатации тяжелая вода загрязняется другими изотопами водорода - протием и тритием и возникает необходимость очистки её от этих примесей. Диссертация Д.Ю. Белкина посвящена ректификационной очистке теплоносителя промышленного тяжеловодного реактора от протия трития в вакуумном ректификационном каскаде. Работа выполнялась в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Разработка и создание эффективных аппаратов-разделителей для получения кондиционной (с концентрацией

99,8%) тяжелой воды на ФГУП «ПО «Маяк»», несомненно, является актуальной и представляет как научный, так и практический интерес.

#### Научная новизна.

На основе систематизации и обобщения обширного экспериментального материала, полученного диссертантом определены геометрические, гидродинамические и массообменные характеристики эффективных регулярных и нерегулярных насадок в процессе вакуумной ректификации воды. Установлены закономерности влияния режима смачивания насадки РЛВН, а также диаметра колонны на эффективность разделения трех изотопов водорода при вакуумной ректификации воды.

Разработан метод математического моделирования и оптимизации параметров каскада вакуумных ректификационных колонн для разделения бинарных смесей изотопов водорода, позволяющий учитывать в ходе расчета локальные по высоте колонны условия разделения для различных типов контактных устройств.

Разработаны методы оптимизации параметров каскада насадочных колонн вакуумной ректификации воды для поддержания концентрация трития в тяжеловодном замедлителе на требуемом уровне.

#### Практическая значимость работы.

Показана возможность использования воды природного изотопного состава для отработки технологии и получения массообменных характеристик контактных устройств насадочного типа «на месте» при создании промышленных разделительных установок разделения изотопов водорода методом ректификации воды под вакуумом.

Экспериментальная проверка метода расчета установки вакуумной ректификации воды, осуществленная на действующем каскаде депротизации тяжеловодного теплоносителя реактора ЛФ-2 показала ее адекватность расчетным данным в области концентрациидейтерия от 99,8 до 0,1 ат. %.

Показана возможность уменьшения объема каскада депротизации тяжелой воды более чем в 4 раза за счет замены колпачковых тарелок на регулярную насадку при сохранении производительности каскада и предложена схема модернизации действующего каскада промышленного тяжеловодного реактора ЛФ-2, позволяющая уменьшить его объем.

Разработана принципиальная схема и определены предварительные технологические параметры для создания вакуумной ректификационной установки детритизации теплоносителя промышленного тяжеловодного реактора ЛФ-2.

Разработана принципиальная схема и определены предварительные технологические параметры для создания установки, состоящей из двух колонн, для получения кондиционной тяжелой воды с концентрациейдейтерия 99,8 ат.% из исходного сырья, содержащего 42 ат.%дейтерия.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы,

включающего 198 наименований и приложения. Работа изложена на 151 странице, содержит 43 рисунка, 26 таблиц.

В первой главе диссертации содержится литературный обзор, в котором описаны физические и нейтронно-физические свойства тяжелой воды как замедлителя и как теплоносителя ядерных реакторов, требования к ее чистоте. Для обеспечения стабильной работы реактора концентрациядейтерия должна быть не менее 99%, а нормальное рабочее значение изотопной чистоты замедлителя составляет 99,8%. Рассмотрены и проанализированы основные методы депротизации и детритизации тяжелой воды. Основное внимание уделено процессу вакуумной ректификации воды как перспективному и безопасному способу разделения изотопов водорода. Рассмотрены типы контактных устройств, их технологические характеристики и отмечено, что наибольшую эффективность разделения проявляют изготовленные из проволоки нерегулярные и регулярные насадки, обладающие высокой удельной поверхностью контакта. Часть обзора посвящена анализу математических моделей процесса ректификационного разделения изотопов водорода. Критический анализ научных работ, связанных с темой диссертации, позволил автору наметить задачи исследования и пути их решения. Материал, изложенный в этой главе, производит хорошее впечатление и позволяет заключить, что Д.Ю.Белкин глубоко владеет результатами научных исследований в этой области, выполненных до настоящего времени.

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментальных установок ректификации воды с колоннами диаметром 60, 150, 250 мм и укрупненной опытной установки, содержащей 10 царг с насадкой высотой 985 мм и диаметром 120 мм, представлены методика проведения экспериментов и методика изотопного анализа. Приведены также методики обработки результатов опытов и показано, что средняя относительная ошибка определения ВЭТС не превышала 10%. Нет сомнения в том, что эта экспериментальная база являлась надежной основой для выполнения глубокого и широкомасштабного изучения основных гидродинамических и массообменных характеристик, необходимых для расчета каскадов колон.

В третьей главе содержатся результаты экспериментального изучения основных закономерностей переноса импульса и массы в колоннах различных диаметров с регулярными и нерегулярными насадками. В широком диапазоне изменений размеров насадки (от 2 до 10 мм) и давлений (от 0,1 до 1 атм) в табл. 3.2 представлены данные по предельной пропускной способности . Их качественное согласование с данными Я.Д. Зельвенского с соавторами (для размеров насадки (2x2, 3x3 и 4x4 мм) позволяет судить о достоверности проведенных измерений (Я.Д.Зельвенский, А.А.Титов, В.А.Шалыгин. Ректификация разбавленных растворов. Л., Химия, 1974, с. 81). Нелинейный характер зависимости пропускной способности от давления согласуется с соотношением, предложенным Кафаровым в его книге «Основы массопередачи» 1962.

Из результатов измерения ВЭТС следует, что ее величина практически не зависит от диаметра колонны, но значительно возрастает с увеличением размера нерегулярной насадки. Для

регулярной насадки пропускная способность существенно выше, чем у нерегулярной, не зависит от диаметра колонны (в диапазоне от 60 до 250 мм) и примерно на 30% выше, чем для насадки Sulzer Mellapak 750. В то же время значения ВЭТС оказались почти в 2 раза выше, чем у насадки «Sulzer». Проведенные исследования показали, что регулярная насадка, размещенная в корпусе колонны с небольшим пристеночным зазором, обладает более высокой эффективностью, по сравнению с регулярной, установленной без зазора. Для практического применения была выбрана насадка РЛВН+(с юбочками).

Полученные технологические результаты работы были использованы для модернизации действующего каскада депротизаций тяжеловодного теплоносителя реакторной установки. В результате модернизации в каскад была включена колонна, заполненная мелкой насадкой диаметром 120 мм и высотой 10 м. Кпд исчерпывающей части каскада возрос с 59 до 70,5%, концентрациядейтерия в отвале снизилась до уровня не более 0,1%, накопление слабых растворов тяжелой воды было прекращено. Главная практическая задача работы успешно решена, о чем свидетельствует приложенная к диссертации, справка о внедрении.

В четвертой главе подробно излагается математическая модель для расчета и оптимизации каскадов разделения изотопов водорода вакуумной ректификацией воды. Рассматривая разделяемую смесь как бинарную, исключая уравнения теплового баланса, методом «от ступени к ступени» на основе уравнений материальных балансов и фазовых равновесий, рассчитывали объем разделительной части каскада. Моделирование каскада со ступенчатым сокращением потоков в итоге сводили к расчету одной колонны с промежуточными дефлегматорами и испарителями. Разделение колонны на ступени проводили либо по максимальной высоте, либо по перепаду давления, поскольку повышение давления снижает относительную летучесть. В качестве исходных данных принимали потоки питания, пара, жидкости и флегмы, концентрации компонентов и давление. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на каскаде депротизаций тяжеловодного замедлителя после модернизации, показало хорошее соответствие. Замена колпачковых тарелок на регулярную насадку, как показал расчет, может привести к сокращению числа колонн и значительному снижению объема разделительной части каскада. Главу завершает расчет установки детритизации замедлителя вакуумной ректификацией воды. В результате получен пятиступенчатый каскад с сокращением потоков, объем которого почти в 2 раза меньше, чем эксплуатирующегося в настоящее время каскада депротизаций. Проведенное математическое моделирование указывает на высокий профессиональный уровень диссертанта.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. В пояснении к рис. 1.14. на стр. 51 отмечается, что гидравлическое сопротивление регулярной насадки в 1,5-2 раза ниже, чем у колец Рашига. Однако, из данных, приведенных на рисунке, следует противоположный вывод.

2. В табл. 1.12. приведены значения нагрузочного фактора для насадки Зульцера BX  $F^*=1,1$ , а для насадки CY  $F^*=0,9$ . По данным немецкого ученого Р. Биллета они равны 2,4 и 1,75 соответственно (см. В.Б.Коган, М.А.Харисов. Оборудование для разделения смесей под вакуумом. Л., Машиностроение, 1976, с. 91, табл. 111.2).

3. На странице 57, обсуждая перспективы совершенствования процесса ректификации воды, диссертант отмечает, что снижение температуры процесса за счет его проведения под вакуумом не приводит к уменьшению энергозатрат вследствие слабой зависимости теплоты испарения от температуры. С этим утверждением нельзя согласиться, поскольку с понижением температуры теплота парообразования воды возрастает и, следовательно, возрастают энергозатраты (см. Н.Б.Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Наука, 1972).

4. В табл. 3.5 приведены данные по зависимости концентрациидейтерия в кубе колонны и в конденсаторе от времени. Опыт продолжался 163 часа. В аналогичных экспериментах, выполненных ПИЯФ (Теор. основы хим. технол., 1997, т.31, №1, с. 32) предельная концентрациядейтерия в кубе была достигнута за 442,8 часа. За счет чего удалось сократить время достижения стационарного состояния?

5. На стр. 112, возможность пренебрежения влиянием удельной нагрузки и давления на ВЭТС диссертант объясняет отсутствием диффузионных сопротивлений в обеих фазах. Что же в таком случае значит  $h=18,2$  см, которое используется в дальнейших расчетах как мера эффективности контактного устройства?

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку данной диссертационной работы, выполненной на хорошем научном и экспериментальном уровне. Достоверность полученных автором результатов подтверждается использованием методик эксперимента, соответствующих современному научному уровню, воспроизводимостью результатов, полученных в лабораторных и промышленных условиях, а также согласованностью результатов с опубликованными данными, представленными в независимых источниках по близкой тематике. Основные выводы диссертации обоснованы и логично вытекают из содержания работы.

Практическая значимость подтверждается представленной в приложении справкой о внедрении результатов работы при модернизации ректификационного каскада регенерационной установки тяжеловодного теплоносителя реактора ЛФ-2 на ФГУП «ПО «Маяк», в результате чего было прекращено накопление слабых тритий содержащих тяжеловодных отходов. Результаты работы могут быть рекомендованы для изучения и внедрения в научных и образовательных организациях, а также на предприятиях Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», в частности в Производственном объединение «Маяк», Петербургском институте ядерной физики имени Б.П. Константинова, Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Радиевом институте имени В.Г. Хлопина.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Результаты работы представлены 7 научных публикациях, в том числе в двух статьях в журнале, включенном в перечень рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

По своему содержанию диссертационная работа Д.Ю. Белкина соответствует паспорту научной специальности 05.17.02 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов в части формулы специальности «Создание и совершенствование технологических схем, ресурсо-, энергосбережение, охрана окружающей природной среды в технологии редких и радиоактивных элементов» и области исследования «Способы утилизации техногенного и вторичного сырья».

Диссертация Д.Ю. Белкина представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технологические решения задачи изотопной очистки от трития и протия замедлителя и теплоносителя тяжеловодного реактора ЛФ-2, имеющей существенное значение для ядерной отрасли страны.

По актуальности, новизне, практической значимости диссертация соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Белкин Дмитрий Юрьевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.02 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

Отзыв на кандидатскую диссертацию Д.Ю. Белкина был рассмотрен и одобрен на заседании Секции «Теоретические основы химической технологии и разработка эффективных химико-технологических процессов» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук 15 марта 2017 г. (Протокол № 72).

Составитель отзыва

кандидат химических наук,

ведущий научный сотрудник

Лаборатории теоретических основ

химической технологии

Ученый секретарь ИОНХ РАН

доктор химических наук

Подпись руки тов

удостоверяю

Зав. канцелярией ИОНХ РАН



Лотков

Валентин Александрович

Бреховских

Мария Николаевна