

ОТЗЫВ

на диссертацию и автореферат диссертации

Солодовника Дмитрия Васильевича

**«СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МАССООБМЕННОГО
УСТРОЙСТВА ДЛЯ АППАРАТОВ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕВОДОРОДНОГО
СЫРЬЯ»**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.02.13 –

«Машины, агрегаты и процессы» (нефтегазовая отрасль).

1. Актуальность избранной темы

На данном этапе развития производств нефтегазовой отрасли повышение экономической эффективности достигается путем увеличения выпуска конечного продукта, которое может быть получено за счет разработки и применения принципиально новых конструкций и технологий, обеспечивающих повышение эффективности процессов сепарации при одновременном снижении энергетических затрат на реализацию процессов. Известно, что всякое повышение эффективности процесса неизбежно связано с увеличением затрат энергии. Поэтому сформулированные в диссертации цели работы и задачи исследований, такие как разработка нового высокоэффективного и высокопроизводительного центробежного массообменного элемента (ЦМЭ) для контактного устройства, позволяющего снизить габаритно-массовые характеристики колонных аппаратов, повысить их производительность при минимизации энергетических затрат и достижении требуемых технологических параметров, являются актуальными и требующими технических решений.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации подтверждается:

– Результатами выполненного соискателем критического аналитического обзора массообменных устройств, их видов, конструктивных исполнений и характеристик, отвечающих за эффективность сепарации, что позволило выбрать наиболее эффективную конструкцию устройства для разделения газожидкостных смесей.

– Результатами разработок и проведенных стендовых испытаний четырёх типов ЦМЭ на производительность по газу 150-450 м³/ч. На основании полученных результатов по изучению гидродинамических характеристик конструкции ЦМЭ автором найдена возможность уменьшить капельный унос и гидравлическое сопротивление устройства; на основании анализа внутренних элементов аппаратов соискателем была выбрана наиболее рациональная конструкция прямоточного центробежного элемента и разработан новый вариант перспективного ЦМЭ.

– Результатами математического моделирования внутренних элементов аппаратов и ЦМЭ в целом, что дало возможность с использованием современных программных комплексов ANSYS и Компас 3D выбрать наиболее рациональную конструкцию прямоточного центробежного элемента. Результаты последующих промышленных испытаний показали, что расхождение показаний количества уноса жидкости на 1 элемент и показания гидравлического сопротивления ЦМЭ относительно натуральных и численных экспериментов по математической модели не превышает 5%. Это доказывает адекватность разработанной математической модели и ее применимость для анализа режимов работы ЦМЭ.

– Результатами практического применения полученных результатов при разработке конструкции колонны К-101, предназначенной для выработки из сырья пентан-додекановой, керосино-газойлевой фракций и фракции тяжелых углеводородов. К-101 является сложной колонной конструкцией и представляет собой вертикальный аппарат переменного сечения диаметром 500/700 мм и высотой обечайки 16100 мм. Не вдаваясь в детали конструкции, укажем, что в секциях колонны было установлено 40 ЦМЭ на 10 тарелках по четыре элемента на каждой с расстоянием между тарелками 600 мм. Полученные результаты

испытаний показали высокую эффективность сепарации газожидкостных смесей в плане уменьшения капельного уноса и гидравлического сопротивления, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Представлена адекватная математическая модель для расчета ЦМЭ, и на ее основе выполнены численные эксперименты для оценки степени достижения поставленных целей и проверено соответствие полученных результатов экспериментальным данным.

2. Разработана принципиальная схема центробежного массообменного устройства, исключающая основные недостатки аналогичных устройств, с возможностью последующего совершенствования.

3. Получена математическая зависимость капельного уноса жидкости и гидравлического сопротивления центробежного массообменного элемента от фактора скорости потока.

4. Исследованы характеристики полей движения в закрученном потоке в результате изменения аэродинамических свойств центробежного массообменного элемента.

5. Достоверность полученных результатов подтверждена количественным и качественным согласием теоретических и экспериментальных результатов работы, а также успешным использованием их в реальных условиях эксплуатации массообменного оборудования.

3. Значимость для науки и практики полученных результатов

Диссертационная работа направлена на решение важных задач – уменьшение металлоёмкости новых массообменных аппаратов, увеличение их производительности и эффективности, и, что более важно, снижение фактора вторичного уноса жидкости и гидродинамического сопротивления. Созданные в процессе работы теоретические основы реализации ЦМЭ и примеры их практического применения открывают возможности создания новых перспективных аппаратов для переработки ШФЛУ, попутных нефтяных газов и сложных многокомпонентных газожидкостных смесей. Такие аппараты могут

быть встроены в современные варианты малогабаритных блочных установок, размещаемых непосредственно на промыслах, и использованы в массообменных блоках установок комплексной подготовки газа, а также в составе комплексных установок подготовки газа. Разработанные общие методы расчета основных конструктивных параметров прямого центрбежного элемента, от которых зависят качественные показатели процесса массообмена газожидкостных смесей, способствуют ускорению вычисления гидравлического сопротивления аппаратов, определению вторичного капельного уноса жидкости и, соответственно, увеличению производительности аппаратов.

4. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

В работе разработана, запатентована и экспериментально отработана в разных условиях конструкция ЦМЭ, позволяющая устранить основной недостаток существующих двухфазных сепарационных устройств – высокий капельный унос и гидравлическое сопротивление (особенно при колебаниях расхода и состава сырья, что характерно для промысловых условий) за счет внесения конструктивных особенностей, внедренных в ходе экспериментального исследования. Внедрение в производство разработанного автором центрбежного контактного устройства позволит:

- решить задачу увеличения производительности установок нефте- и газоподготовки путем замены контактных устройств, уже установленных в колоннах;
- снизить энергозатраты при работе на установках с колонными аппаратами за счет более эффективных сепарационных устройств газ – жидкость;
- снизить металлоемкость при производстве новых колонных аппаратов с установленными центрбежными массообменными устройствами, а именно: за счет уменьшения высоты, более высоких эксплуатационных показателей данных контактных устройств и меньшего межтарельчатого расстояния;
- использовать стендовое оборудование и разработанные методики исследования для проведения экспериментальных исследований центрбежных элементов, которые в дальнейшем послужат для исследования вновь разрабатываемых моделей.

Внедрение результатов данной диссертационной работы обеспечит возможность в кратчайшие сроки оптимизировать работу уже введенных в эксплуатацию установок с применением сепараторов и повысит уровень проектирования новых аппаратов.

5. Заключение о соответствии диссертации и автореферата требованиям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней

В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. N 335 диссертация на соискание ученой степени кандидата наук должна быть научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, либо изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны. Диссертация должна быть написана автором самостоятельно, обладать внутренним единством, содержать новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствовать о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации, имеющей прикладной характер, должны приводиться сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. Предложенные автором диссертации решения должны быть аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями. Основные научные результаты диссертации должны быть опубликованы в рецензируемых научных изданиях (далее - рецензируемые издания). Количество публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, в рецензируемых изданиях должно быть не менее 2, включая патенты на изобретения, патенты (свидетельства) на полезную модель, патенты на промышленный образец.

Отметим, что представленная диссертация и автореферат удовлетворяют всем указанным требованиям. Работа хорошо оформлена и иллюстрирована в соответствии с требованиями ГОСТ Р7.0.11-2011, изложение содержания логически последовательно и методологически верно отражает суть работы.

Следует отметить, что текст диссертации отличается хорошим литературно-техническим языком.

6. Личный вклад соискателя в разработку научной проблемы

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в разработке вариантов конструкций моделей центробежного массообменного элемента, проведении опытных испытаний на гидродинамическом стенде при режимах, приближенных к производственным, разработке методики расчета гидродинамических характеристик и разработке теоретических основ новой методики определения капельного уноса.

7. Содержание диссертации, её завершённость, подтвердить публикации автора

Рецензируемая работа состоит из введения, пяти разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников (101 наименование). Работа изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц, 51 рисунок и 6 приложений.

В первой главе представлен аналитический обзор существующих контактных устройств, их видов, конструктивных исполнений и характеристик, отвечающих за эффективность, сложность изготовления и стоимость. Сравнительный анализ проведен по следующим параметрам: производительности; гидравлическому сопротивлению; эффективности при рабочих нагрузках; диапазону рабочих нагрузок в условиях высокой эффективности; сопротивлению одной теоретической тарелки при рабочих нагрузках; возможность работы на средах, склонных к образованию инкрустаций, к полимеризации; простоте конструкции, проявляющуюся в трудоемкости изготовления, монтажа, ремонтов. Сделан вывод, что с целью снижения энергоемкости технологических процессов, а так же капитальных и эксплуатационных затрат, широкое применение находят совмещенные процессы, для которых характерно использование многофункциональных аппаратов с одновременным протеканием стадий реакции, массопереноса и последующего разделения контактирующих фаз. Поэтому контактные устройства, использующие

ЦМЭ, обладают рядом решающих преимуществ перед другими техническими решениями. В главе сформулированы требования к ЦМЭ, основными из которых являются: закрутка фаз за счет лопаток завихрителя, сохранение неразрывности газожидкостного потока, развитие межфазной поверхности, сепарация газа и жидкости в зазоре между корпусом элемента и каплеотбойником. Указывается, что существующие технические решения ЦМЭ имеют общий недостаток, связанный с наличием центральной поперечной трубки, которая является причиной дробления потока во время его закрутки, увеличивает унос капель, что приводит к снижению эффективности центробежного массообменного устройства. Данные недостатки отсутствуют в центробежном сепарационном элементе ОАО "НИПИгазпереработка" (патент № 2140317), на основе которого был создан образец центробежного массообменного устройства.

Вторая глава посвящена разработке математической модели ЦМЭ и получению теоретических зависимостей для расчета основных параметров, характеризующих работу ЦМЭ (скорость газа, производительность, скорость вращения центробежного слоя, межфазная поверхность, критические условия перехода гидродинамических режимов и т.д.). Для расчета гидравлического сопротивления соискателем была предложена параболическая зависимость

$$\Delta P = A \cdot F_c^2 - B \cdot F_c + C, \quad \text{где } A, B, C - \text{коэффициенты гидравлического}$$

сопротивления, определяемые для каждого элемента экспериментальным путем. Для расчета капельного уноса жидкости был предложен полином типа

$\eta = A_1 F_c^4 - B_1 F_c^3 + C_1 F_c^2 - D_1 F + E_1$, коэффициенты которого определялись экспериментальным путем, F – фактор параметра потока равный $L/V(\rho_v/\rho_l)^{0.5}$.

В третьей главе описаны экспериментальные установки, созданные для исследования центробежных массообменных элементов, и методики проведения экспериментов. Для проведения исследований было изготовлено пять моделей ЦМЭ, отличающихся внутренними устройствами. Для проведения экспериментов было изготовлено два стенда и разработаны методики для работы на них. Первый стенд предназначен для демонстрации работы элементов, а так же для определения эффективности по капельному уносу жидкости и

гидродинамическому сопротивлению прямоточных ЦМЭ, выполненных в натуральную величину, при расходных характеристиках, соответствующих рабочим условиям в ЦМЭ. Второй стенд предназначен для проведения аэродинамических исследований прямоточного ЦМЭ с профилированной проточной частью и тангенциальным завихрителем с вариацией наклона лопаток и расходов газового потока перед завихрителем $100\text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_2=200\text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_3=300\text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_4=400\text{ м}^3/\text{ч}$.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования всех пяти разработанных соискателем моделей ЦМЭ. Было установлено, что общим недостатком всех предложенных вариантов конструкций является унос жидкости из элемента по поверхности питающей трубки. В результате проведенных экспериментов и конструкторских усовершенствований найдено решение, обеспечивающее минимальный унос капель. В итоге, модель № 4 ЦМЭ состоит из корпуса, завихрителя, каплеотбойника, питающей трубки и каплеотсекателя. Проведенные эксперименты на данной конструкции показали, что на ней можно эффективно работать при максимальном расходе жидкости 690 л/ч , при этом величина гидравлического уноса не превышает 5% . Применительно к условиям модели №4 определены коэффициенты зависимостей капельного уноса и гидравлического сопротивления, полученные ранее в главе 2.

С помощью трубки Пито исследованы характеристики внутренних закрученных течений, такие как радиус зоны обратных течений в зависимости от закрутки потока, максимальные значения составляющих скоростей, угол закрутки потока на стенке канала, азимутальная и радиальная неравномерность поля скоростей.

В пятой главе изложена практическая реализация результатов исследования. На основе теоретических и экспериментальных исследований ЦМЭ модели №4 соискателем был разработан промышленный образец. Результатами практического применения полученных результатов является их использование при разработке конструкции колонны К-101, предназначенной для выработки из сырья пентан-додекановой, керосино-газойлевой фракций и фракции тяжелых углеводородов. К-101 является сложной колонной конструкцией и представляет собой вертикальный аппарат переменного сечения диаметром $500/700\text{ мм}$ и высотой

обечайки 16100 мм. В секциях колонны было установлено 40 ЦМЭ на 10 тарелках по четыре элемента на каждой с расстоянием между тарелками 600мм. Полученные результаты испытаний показали высокую эффективность сепарации газожидкостных смесей в плане уменьшения капельного уноса и гидравлического сопротивления, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Таким образом, рецензируемая работа представляет законченное научное исследование, направленное на разработку научных основ нового типа ЦМЭ, создание конструкции аппарата, экспериментальную проверку его работоспособности в стендовых и на реальных смесях попутных нефтяных газов. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (Скопус), 2 патента РФ.

Результаты диссертации были доложены на следующих конференциях:

- Всероссийской межотраслевой конференции (ВМОС) «Современные массообменные устройства для процессов переработки углеводородного сырья», г.Геленджик ,сентябрь 2012г.;
- Международной научно-практической конференции «Сбор, подготовка и транспортировка углеводородов – 2013», г.Сочи, Краснодарский край, 25 – 30 марта 2013 г.;
- Международной научно-практической конференции «Совершенствование процессов переработки попутного нефтяного газа – 2014», г. Анапа, 22 – 27 сентября 2014 г.;
- XVII Международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех–2016», г. Ухта, 23 – 25 марта 2016г.

8 Замечание по работе

По содержанию диссертации имеются следующие замечания.

1.Объединение в одной работе столь многочисленных вариантов устройств не могло не отразиться на глубине проработки решаемых вопросов. Так, например, излишне подробно, на мой взгляд, дан анализ существующих конструкций, отличающихся способом массообмена в главе 1. По моему мнению,

без ущерба для основного содержания можно было бы несколько сократить описание видов массообменных устройств.

2. Таблицу 1.1 (стр.15) непосредственно в диссертационной работе можно было бы не приводить, а вынести её как дополнительную информацию в приложение.

3. Более подробно объяснить на Рис.1.16 и 1.17, как поступает воздух или газ в ЦМЭ.

4. Полученные корреляции для гидравлического сопротивления (2.21) и уноса капель (2.22) в виде полиномов справедливы только для данного типа конструкции ЦМЭ. Это необходимо отметить. В работе не сделана попытка сравнить полученные экспериментальные результаты с данными других авторов.

5. Смещено наименование рисунка 4.2 на с. 83.

6. Рисунки 4.1 – 4.6 можно было бы разместить в приложении, чтобы не нагружать основной текст.

7. На Рис. 4.7 представлена очень странная кривая вода/воздух 3/5. Почему проведена так? Следовало бы проверить точку при $F_c=70$.

8. По Рис. 5.3: почему в аппарате идет разделение на фракции. Что есть движущая сила процесса? К сожалению, в работе приведены только кратко результаты промышленных испытаний, а по моему мнению, следовало бы в Приложении представить и сам журнал проведения испытаний.

9. Безумно краткие выводы по диссертации. Они свидетельствуют о том, что из-за излишней скромности соискатель недооценивает важность своей работы.

9. Заключение

Указанные замечания носят частный характер и не снижают качества и важности выполненных исследований. В целом диссертационная работа Солодовника Д.В. «Совершенствование центробежного массообменного устройства для аппаратов переработки углеводородного сырья», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является научно-квалификационной работой, показывающей высокий научный уровень, результаты

которой имеют существенное значение для газовой отрасли, имеющей значимую научную новизну и практическую ценность.

Диссертационная работа соответствует требованиям Постановления правительства РФ от 24.09.2013г. №842 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Солодовник Дмитрий Васильевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

Кириллов Валерий Александрович

630090 г. Новосибирск,

Пр. академика Лаврентьева, д. 5.

Раб. тел.: +7 383 330 61 87

Эл. адрес: vak@catalysis.ru

Главный научный сотрудник

Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук (ИК СО РАН)

Д-р техн. наук, проф.

В.А. Кириллов

Подпись В.А. Кириллова Заверяю:

Ученый секретарь ИК СО РАН

Д-р хим. наук, проф.

М.п.



Д.В. Козлов