

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 69.004.183(043.3)

АЛЬ-САЭДИ
Майтам Джабар Наджим

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАССОПЕРЕДАЧИ
В АППАРАТАХ С КЛАПАННО-СИТЧАТЫМИ ТАРЕЛКАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.17.08 – процессы и аппараты химических технологий

Минск, 2018

Работа выполнена на кафедре химической техники учреждения образования «Полоцкий государственный университет».

Научный руководитель **Халил Валид Бадр,**
кандидат технических наук, доцент, инженер-проектировщик ИООО «УНИСнефтепроект»

Официальные оппоненты: **Журавский Геннадий Иванович,**
доктор технических наук, главный научный сотрудник института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Протасов Семен Корнеевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры физикохимии материалов и производственных технологий учреждения образования «Белорусский государственный экономический университет»

Оппонирующая организация **«Белорусский национальный технический университет»**

Защита состоится 20 июня 2018 г. в 14⁰⁰ в аудитории 240 корпуса 4 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а). Телефон ученого секретаря совета: +375 17 327 56 20, *E-mail*: dyadenko-mihail@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Полоцкий государственный университет» и библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «17» мая 2018 года.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



Дяденко М.В.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях непрерывного увеличения мощностей в отрасли нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности к массообменной аппаратуре предъявляются все более жесткие требования по ее производительности и эффективности массопередачи. Несомненным способом увеличения мощностей массообменных аппаратов является использование в них высокоэффективных массообменных контактных устройств, отдельными представителями которых выступают *клапанные тарелки* с перекрестно-прямоточным движением фаз, обладающие высокой производительностью по газу и жидкости, а также развитой поверхностью контакта фаз. Предпочтительность данных тарелок по отношению к другим контактными устройствам обеспечивается за счет подвижного элемента – клапана, благодаря которому возможно расширение диапазона устойчивой эффективной работы тарелки.

Существенным недостатком тарелок с перекрестно-прямоточным течением фаз является то, что при высоких нагрузках по газовой фазе происходит интенсивный прямоток, вследствие чего время пребывания жидкости на тарелке уменьшается и, следовательно, снижается эффективность массопередачи. Данная проблема повышает интерес к комбинированным конструкциям тарелок, сочетающих преимущества клапанных и ситчатых тарелок. Для данных тарелок увеличивается запас жидкости на тарелке, а также диапазон её устойчивой работы, расширяется зона саморегулирования клапанов, повышается удельная поверхность контакта фаз. Как следствие, такие тарелки обладают высокой производительностью прямоточных клапанных тарелок наряду с высокой эффективностью ситчатых тарелок. Разработанная в диссертационной работе тарелка обладает высокой производительностью, характерной для прямоточных клапанных тарелок, наряду с высокой эффективностью ситчатых тарелок.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Данная работа включена в утвержденный научный план работы Учреждения образования «Полоцкий государственный университет» на 2010 – 2013 годы.

Тема диссертационного исследования соответствует одному из наиболее приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь – химические технологии, нефтехимия по разделу технологии нефте-

добычи, нефтепереработки и нефтехимии, закрепленного Указом Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 г. № 166.

Актуальность проблемы

В связи с высоким темпом развития нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, увеличением объема и полноты перерабатываемого сырья требуется создание и применение эффективных высокопроизводительных массообменных аппаратов, позволяющих решать эти задачи.

Увеличение производительности массообменного оборудования при уменьшении металлоемкости возможно при использовании в массообменных аппаратах высокоэффективных контактных устройств, в частности клапанных тарелок.

Установлено, что клапанные тарелки имеют самый широкий диапазон устойчивой работы, однако не всегда создают высокоразвитую поверхность контакта фаз, необходимую для интенсивного массообмена, особенно при высоких нагрузках по газовой фазе.

Разработанные новые контактные устройства клапанного типа, оснащенные перфорированным колпачком, позволяют всегда создавать мелкопузырьковый барботажный слой, что способствует формированию максимальной поверхности массообмена.

Сочетая в себе преимущества как клапанной, так и ситчатой тарелок, новое контактное устройство имеет высокую эффективность массопередачи и низкое гидравлическое сопротивление, благодаря чему возможно широкое его использование в процессах тепломассообмена.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является установление закономерностей изменения гидродинамических и массообменных характеристик клапанной тарелки с перфорированными колпачками и получение аналитических зависимостей для их расчета.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

- определить гидравлическое сопротивление и устойчивые режимы работы клапанной тарелки с перфорированными колпачками;
- определить межтарельчатый унос в аппарате с предлагаемыми контактными устройствами;
- определить эффективность массопередачи новых контактных устройств при изменении конструктивных и технологических параметров;
- получить эмпирические формулы для расчета указанных выше гидродинамических и массообменных характеристик;
- провести сравнительный анализ новых и традиционных контактных устройств и доказать перспективность использования новых контактных устройств в производстве.

Объект исследования – клапанная тарелка с перфорированными колпачками.

Предмет исследования – гидродинамические и массообменные характеристики клапанной тарелки новой конструкции.

Научная новизна диссертационной работы заключается в установлении закономерностей изменения гидродинамических и массообменных характеристик, определении режимов устойчивой работы предложенной автором клапанной тарелки с перфорированными колпачками и получении эмпирических зависимостей для их расчета, которые могут быть использованы при разработке и конструировании массообменных аппаратов с новыми контактными устройствами.

Практическая ценность

Практическая значимость результатов проведенных исследований в виде разработки новых конструкций контактных массообменных устройств клапанного типа с низким гидравлическим сопротивлением и высокой эффективностью массопередачи подтверждается *актом о целесообразности внедрения* предлагаемой конструкции в ректификационных и абсорбционных колоннах ОАО «Нафтан» (г. Новополоцк), *актом о практическом использовании* (внедрении) результатов диссертационной работы в учебном процессе первой и второй ступеней образования Учреждения образования «Полоцкий государственный университет». Уравнения для расчета гидравлического сопротивления и эффективности новых контактных устройств позволяют определять габариты массообменных аппаратов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности изменения гидравлического сопротивления и межтарельчатого уноса в массообменных аппаратах с клапанными тарелками, снабженными перфорированным колпачком, позволяющие установить оптимальные режимы работы тарелок и получить расчетные зависимости для определения межтарельчатого расстояния и энергозатрат на проведение процесса.

2. Экспериментальные зависимости изменения эффективности массопередачи в широком диапазоне варьирования скорости газа и плотности орошения, при статистической обработке которых получены эмпирические уравнения для её расчета и дальнейшего определения необходимого количества тарелок в аппарате.

3. Результаты сравнительного анализа гидродинамических и массообменных характеристик разработанной клапанной тарелки с перфорированными колпачками и широко применяемой прямоточной клапанной, показавшие повышение эффективности массопередачи при её использовании в $1,25 \div 1,45$ раза, снижение гидравлического сопротивления на 20 – 40 % и значительно меньший межтарельчатый унос, что указывает на широкие возможности практической реализации предлагаемого контактного устройства.

Личный вклад соискателя ученой степени

Автором самостоятельно подготовлены основные положения, выносимые на защиту, результаты теоретических и экспериментальных исследований, материалы научных публикаций. Определение целей и задач исследований, обобщение полученных результатов проводилось при консультации с научным руководителем кандидатом технических наук, доцентом В. Б. Халилом.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертации представлялись и обсуждались на следующих международных и республиканских научно-технических конференциях: Junior researchers' conference «European and national dimension in research» (Polotsk State University, Novopolotsk, April 2011, 2012, 2013, 2014); международной научно-технической конференции «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов» (БГТУ, Минск, 2012).

Опубликование результатов диссертации

По результатам диссертационных исследований опубликовано 9 работ, включенных в список публикаций соискателя, в том числе: 3 статьи в рецензируемых научных изданиях (1,15 авт. листа), включенных в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований; 5 публикаций в материалах научно-практических конференций (1,92 авт. листа); 1 патент Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка, приложений.

Полный объем диссертации составляет 163 страниц, включая 66 иллюстраций на 40 страницах, 3 таблицы на 2 страницах, библиографический список из 120 наименований, включая список публикаций соискателя – 9 наименований, на 9 страницах, 3 приложения на 43 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе представлены конструктивные особенности тарельчатых контактных устройств и рассмотрены основные гидродинамические режимы работы тарельчатых колонн. Проведена классификация тарельчатых контактных устройств по различным признакам.

Отмечена необходимость создания тарелок, обладающих низким гидравлическим сопротивлением и малым брызгоуносом при высоких нагрузках по газу в колонне. Проведен обзор последних современных разработок в области конструирования клапанных и комбинированных тарелок, изложены основные направления оптимизации конструкций данных тарельчатых устройств.

Затрагивается проблема снижения эффективности массопередачи вследствие небольшого времени пребывания жидкости на тарелке при высоких скоростях. Рассмотрены различные конструктивные решения модернизации контактных устройств. Для интенсификации массообмена во всем диапазоне работы тарелки и, в частности, в области высоких нагрузок по газу предлагается клапанная тарелка нового типа, обеспечивающая высокую эффективность массообмена за счет увеличения поверхности контакта фаз вследствие интенсивного диспергирования газовой фазы в слой жидкости.

В данной диссертационной работе *предметом исследования* являлись гидродинамические и массообменные характеристики клапанной тарелки новой конструкции. В связи с этим были рассмотрены труды различных авторов по исследованиям гидравлического сопротивления тарельчатых устройств, межтарельчатого уноса и эффективности массообмена. Методики исследования тарельчатых устройств данных авторов использованы соискателем в диссертационной работе при проведении экспериментов и анализе полученных данных.

Во второй главе работы описывается клапанная тарелка новой конструкции (рисунок 1), конструктивные варианты исполнения колпачка исследуемой тарелки (четыре различных варианта). Также описывается экспериментальная лабораторная установка и методики проведения экспериментов по исследованию гидродинамических и массообменных характеристик исследуемых тарелок: гидравлическое сопротивление сухих и орошаемых тарелок, межтарельчатый унос, эффективность массопередачи по газу и жидкости.

Полотно тарелки представляет собой стальную пластину диаметром 240 и толщиной 3 мм. В полотне тарелки имеются семь отверстий под колпачки и вырез в форме сегмента, предназначенный для перетока жидкости на нижележащую тарелку; также установлена планка приемного порога и сливная перегородка.

Саморегулирующиеся дисковые клапаны тарелки устанавливаются в перфорированные колпачки на отверстия в её полотне и способны подниматься при движении пара (газа). Диаметр отверстий в тарелке для прохода газовой фазы несколько меньше диаметра дисковых клапанов и перфорированных колпачков, благодаря чему клапан удерживается на тарелке. Высота подъема клапана ограничивается высотой колпачка. Семь клапанов тарелки установлены в два ряда по направлению потока жидкости на тарелке: четыре клапана – в первом ряду, три клапана – во втором ряду по направлению движения потока жидкости. Расстояние между рядами клапанов – 40 мм, расстояние между клапанами в ряду – 35 мм.

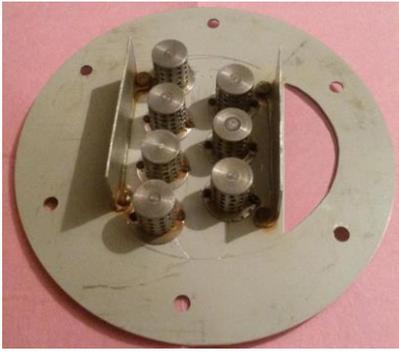


Рисунок 1. – Клапанная тарелка новой конструкции

Свободно лежащий над отверстием в тарелке клапан с изменением расхода газа своим весом автоматически регулирует величину площади зазора между клапаном и плоскостью тарелки для прохода газа и тем самым под держивает постоянной скорость газа при его истечении в барботажный слой. При этом с увеличением скорости газа в колонне гидравлическое сопротивление клапанной тарелки увеличивается незначительно.

Исследования новой тарелки в настоящей работе проведены с двумя значениями высоты колпачков: 27 и 21 мм. Кроме этого в двух вариантах была выполнена перфорация колпачка: с диаметром отверстий 2 и 3 мм.

Исследование уноса жидкости потоком газа проводилось на системе «вода – воздух». Для определения уноса жидкости потоком газа с исследуемой тарелки в верхней части колонны был смонтирован сетчатый каплеотбойник. Жидкость, отделившаяся от потока газа, выходящего из колонны, стекает с каплеотбойника в сборник жидкости. По соотношению объема жидкости, скопившейся в сборнике за единицу времени, к объемному расходу жидкости, подаваемой в колонну по показаниям ротаметра, определялось процентное значение уноса.

Исследования уноса жидкости проводились в зависимости от расстояния между тарелкой и каплеотбойником и нагрузок по газу и жидкости.

При исследовании гидравлического сопротивления тарелки новой конструкции проводились измерения разности давлений под и над тарелкой при помощи дифференциального манометра, в условиях переменных нагрузок по газу и жидкости.

На тарелке также исследовалась эффективность массопередачи по жидкости при десорбции диоксида углерода из воды воздухом.

При этом осуществлялись измерения рН воды поступающей на тарелку и выходящей с тарелки соответственно.

Эффективность массопередачи по жидкости определялась по уравнению

$$E_{ML} = 1 - 10^{-(pH_K - pH_H)}, \quad (1)$$

где pH_H и pH_K – рН воды на входе и выходе с тарелки соответственно.

В работе проводили исследование влияния на эффективность тарелки скорости газа в свободном сечении колонны, плотности орошения тарелки.

На тарелке также исследовали эффективность массопередачи по газу при насыщении воздуха влагой. Для измерения влажности воздуха на входе в ко-

лонну и на выходе из нее в нижней царге и в верхней части колонны установлены термогигрометры.

Эффективность при испарении жидкости определялась на системе «воздух – вода» с учетом влажности воздуха на входе $x_{вх}$, кг/м³, в колонну и выходе, $x_{вых}$, кг/м³, из нее по формуле

$$E = \frac{x_{вых} - x_{вх}}{x_{100} - x_{вх}}, \quad (2)$$

где x_{100} – абсолютная влажность воздуха насыщенного водяным паром, кг/м³.

В третьей главе представлены результаты исследования гидродинамических и массообменных характеристик клапанных тарелок новой конструкции.

В результате экспериментальных исследований выявлено, что зависимость гидравлического сопротивления сухих и орошаемых клапанных тарелок новой конструкции от фактора скорости газа в рабочем сечении тарелки имеет две характерные области. При низких значениях скорости газа в рабочем сечении тарелки сила, действующая на клапан, со стороны газа равна его весу, клапаны тарелки перемещаются по высоте колпачка. Данный режим работы тарелки (участок I) соответствует режиму саморегулирования. При дальнейшем увеличении скорости газа клапаны тарелки принимают крайнее верхнее положение. Свободное сечение становится постоянным, и сопротивление сухой тарелки на участке II растет пропорционально квадрату скорости газа.

На основе исследования гидравлического сопротивления клапанной тарелки новой конструкции в работе предложено использовать уравнение (3) как общее уравнение сопротивления сухих клапанных тарелок нового типа

$$\Delta P_1 = \begin{cases} \frac{m \cdot g}{S_{кл}} + \left(\frac{A}{\exp} (F_p) \right) \cdot F_p^2 & 0 \leq F_p < F_{I-II}, \\ \frac{\rho}{2} \cdot \varepsilon_{откр} \cdot F_p^2 \cdot \left(\frac{S_p}{S_o} \right)^2 & F_p > F_{I-II}, \end{cases} \quad (3)$$

где m – масса клапана, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$S_{кл}$ – площадь поперечного сечения клапана, м²;

$\varepsilon_{откр}$ – коэффициент сопротивления тарелки с полностью открытыми клапанами, отнесенный к скорости газа в отверстиях полотна тарелки;

F_p – фактор скорости газа, отнесенный к рабочей площади тарелки, кг^{0,5}/(м^{0,5}·с);

S_p – рабочая площадь тарелки, м²;

S_o – площадь всех отверстий в полотне тарелки, м²; ρ – плотность газа, кг/м³.

Неизвестные коэффициенты и границы режимов F_{I-II} в уравнении (3) были определены путем статистической обработки экспериментальных данных для конкретной конструкции тарелки. В результате получены зависимости гидравлического сопротивления сухих тарелок от фактора скорости газа.

В ходе анализа экспериментальных данных – значений гидравлического сопротивления – предложено использовать аддитивный подход, определяя общее сопротивление как сумму сопротивления сухой тарелки и сопротивления газожидкостного слоя по формуле (4).

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2, \quad (4)$$

где ΔP_1 – гидравлическое сопротивление сухой тарелки, Па;

ΔP_2 – гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя на тарелке, Па.

Для дальнейшего анализа были найдены экспериментальные значения сопротивления газожидкостного слоя на тарелке по формуле

$$\Delta P_2 = \Delta P - \Delta P_1. \quad (5)$$

Для расчета сопротивления газожидкостного слоя на клапанной тарелке нового типа предложено следующее уравнение:

$$\Delta P_2 = \begin{cases} A(q) + B(q) \cdot F_p & 1,08 \leq F_{I-II}, & 1,08 \leq F_p < F_{I-II} \\ (A(q) + B(q) \cdot F_{I-II}) \cdot \exp[C(q)(F_p - F_{I-II})] & F_p > F_{I-II}. \end{cases} \quad (6)$$

где $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ – функции от плотности орошения тарелки.

Для всех четырех вариантов тарелки, отличающихся конструктивным исполнением колпачков, выполнена статистическая обработка данных и определены коэффициенты регрессии. В результате получены уравнения сопротивления газожидкостного слоя.

Исследования межтарельчатого уноса жидкости потоком газа проводилось в зависимости от скорости газа, приведенной к рабочему сечению тарелки, различных плотностей орошения тарелки и расстояния между тарелкой и каплеотбойником.

В результате анализа экспериментальных данных в диссертационной работе предлагается следующее общее выражение зависимости межтарельчатого уноса жидкости от скорости газа и расстояния между тарелками:

$$e = A \cdot \frac{w^B}{H^C}, \quad (7)$$

где e (кг жидкости/кг газа) – относительный унос жидкости на вышележащую тарелку;

w – скорость газа в колонне, м/с;

H – расстояние от тарелки до каплеотбойника, м;

A, B, C – коэффициенты регрессии.

В результате статистической обработки экспериментальных данных были определены значения коэффициентов A, B и C .

В работе проведено исследование эффективности массопередачи по газу на тарелке при насыщении воздуха влагой в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки.

На основе анализа экспериментальных значений эффективности предложено общее уравнение для описания зависимости эффективности тарелки по газу от фактора скорости газа и интенсивности орошения тарелки вида

$$E_V = q^{b_0} \cdot \exp(b_1 \cdot F_p + b_2 \cdot F_p^2 + b_3 \cdot F_p^3), \quad (8)$$

где E_V – эффективность тарелки по газу; q – плотность орошения тарелки, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;

F_p – фактор скорости газа в рабочем сечении тарелки, $\text{кг}^{0,5}/(\text{м}^{0,5} \cdot \text{с})$;

b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты регрессии.

В результате регрессионного анализа при помощи статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения, описывающие эффективность тарелки нового типа по газу для четырех вариантов конструкционного исполнения колпачков тарелки.

В диссертационной работе проведено исследование эффективности тарелки по жидкости при десорбции диоксида углерода из воды воздухом в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки.

В ходе анализа экспериментальных данных предложено общее уравнение, описывающее зависимость эффективности тарелки по жидкости в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки вида

$$E_L = q^{b_0} \cdot \exp(b_1 \cdot F_p + b_2 \cdot F_p^2 + b_3 \cdot F_p^3 + b_4 \cdot q \cdot F_p), \quad (9)$$

где E_L – эффективность тарелки по жидкости;

q – плотность орошения тарелки, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;

F_p – фактор скорости газа в рабочем сечении тарелки, $\text{кг}^{0,5}/(\text{м}^{0,5} \cdot \text{с})$;

b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты регрессии.

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных получены уравнения, описывающие эффективность клапанных тарелок нового типа по жидкости.

В четвертой главе работы проведено сопоставление гидродинамических характеристик и эффективности массопередачи тарелок новой конструкции с характеристиками прямоточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ, широко используемой в процессах нефтепереработки и нефтехимии.

Зависимости гидравлического сопротивления сухих тарелок новой конструкции и гидравлического сопротивления сухой тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ от фактора скорости газа в рабочем сечении тарелки приведены на рисунках 2–5.

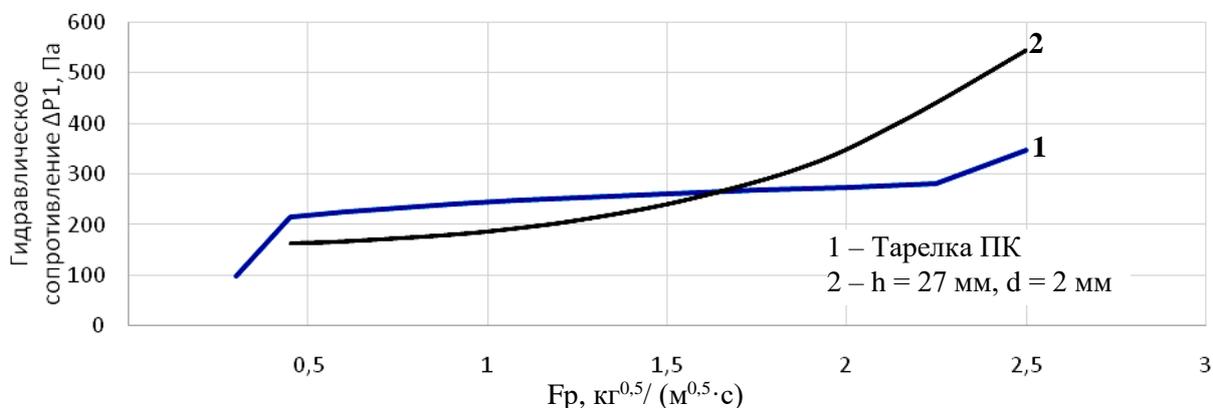


Рисунок 2. – Зависимости гидравлического сопротивления сухих тарелок от фактора скорости газа: клапанной тарелки новой конструкции (1-ый вариант колпачков) и прямооточной клапанной тарелки

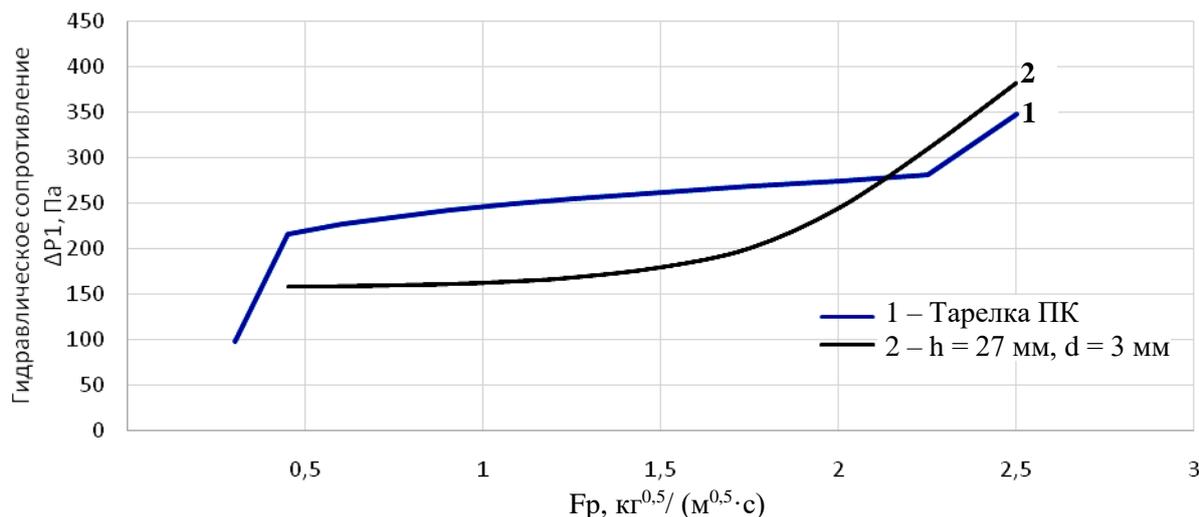


Рисунок 3. – Зависимости гидравлического сопротивления сухих тарелок от фактора скорости газа: клапанной тарелки новой конструкции (2-ый вариант колпачков) и прямооточной клапанной тарелки

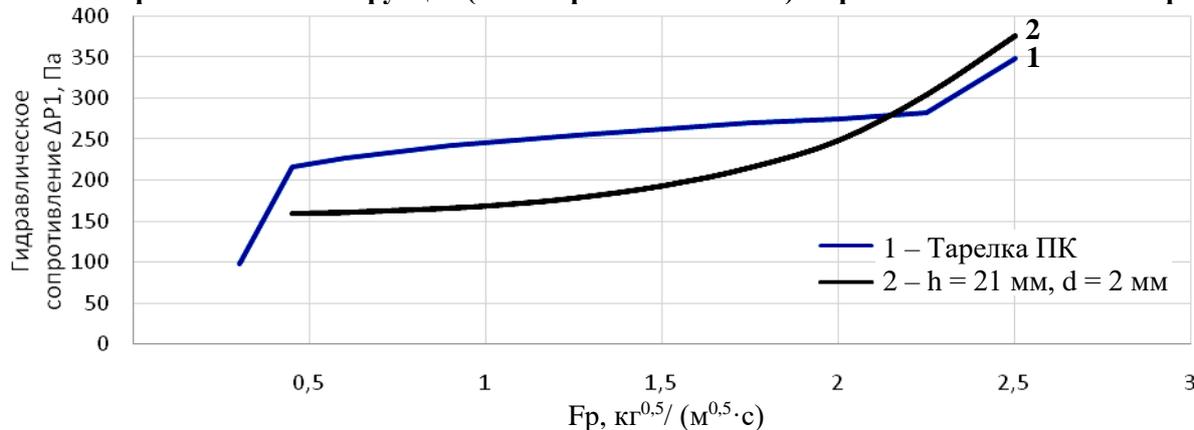


Рисунок 4. – Зависимости гидравлического сопротивления сухих тарелок от фактора скорости газа: клапанной тарелки новой конструкции (3-ый вариант колпачков) и прямооточной клапанной тарелки

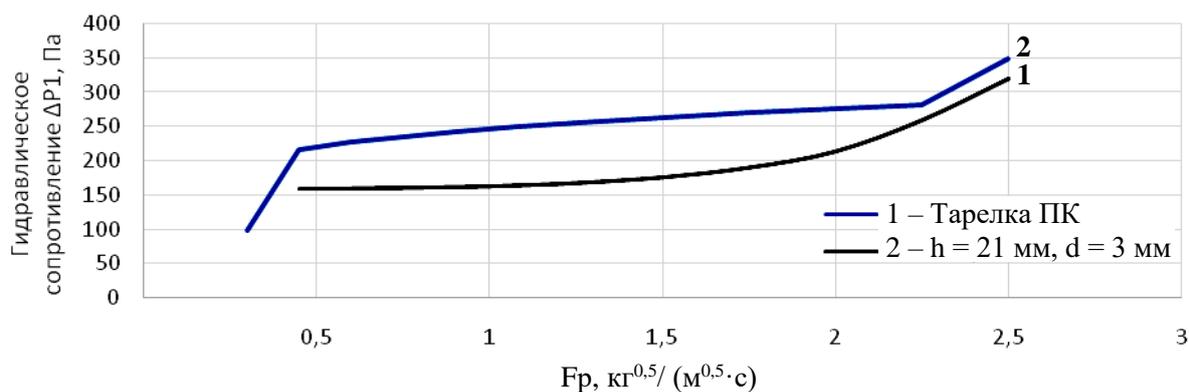


Рисунок 5. – Зависимости гидравлического сопротивления сухих тарелок от фактора скорости газа: клапанной тарелки новой конструкции (4-ый вариант колпачков) и прямооточной клапанной тарелки

В работе показано, что за счет меньшего веса клапана сопротивление тарелок новой конструкции в диапазоне саморегулирования меньше сопротивления прямооточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ на величину около 30%.

Показано существенное влияние перфорации колпачка тарелки на величину гидравлического сопротивления сухой тарелки и возможность снижения сопротивления тарелки новой конструкции на 8% по сравнению с прямооточной клапанной тарелкой в диапазоне полного открытия клапанов путем подбора оптимальной конструкции колпачка тарелки.

Проведенный анализ ширины диапазона саморегулирования клапанных тарелок новой конструкции свидетельствует о том, что ширина диапазона саморегулирования тарелок новой конструкции сопоставима с таковой для прямооточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ. Определено, что оптимальным вариантом колпачка новой тарелки с точки зрения гидравлического сопротивления и ширины диапазона саморегулирования является вариант 4.

Зависимости полного гидравлического сопротивления тарелок новой конструкции и прямооточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ от фактора скорости газа приведены на рисунках 6–9.

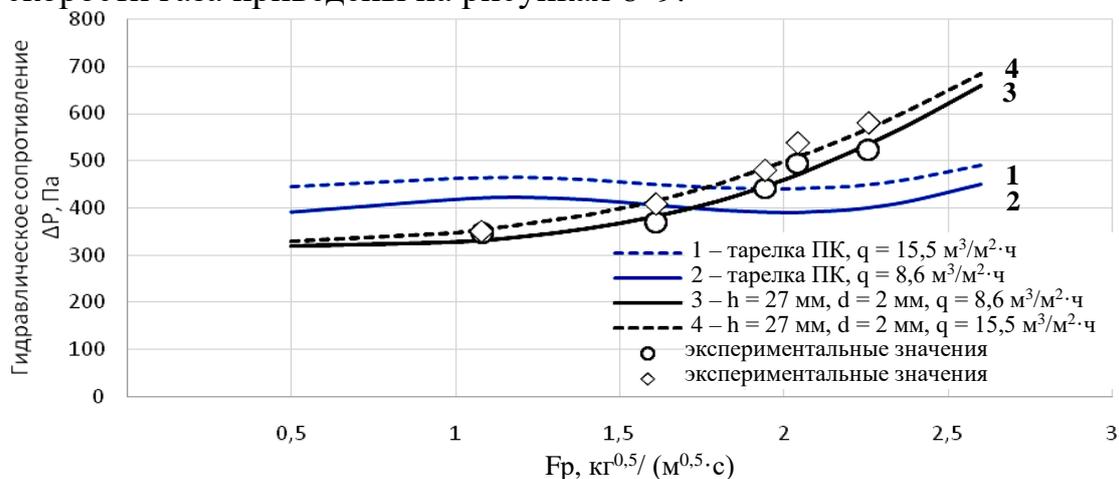


Рисунок 6. – Зависимости гидравлического сопротивления орошаемой клапанной тарелки новой конструкции (1-ый вариант колпачков) и прямооточной клапанной тарелки от фактора скорости газа

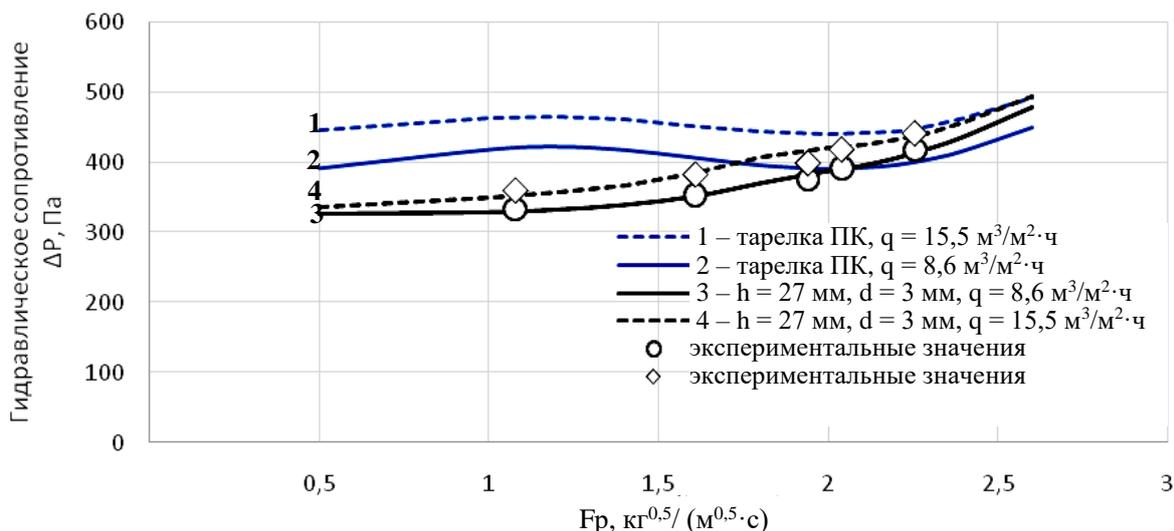


Рисунок 7. – Зависимости гидравлического сопротивления орошаемой клапанной тарелки новой конструкции (2-ый вариант колпачков) и прямооточной клапанной тарелки от фактора скорости газа

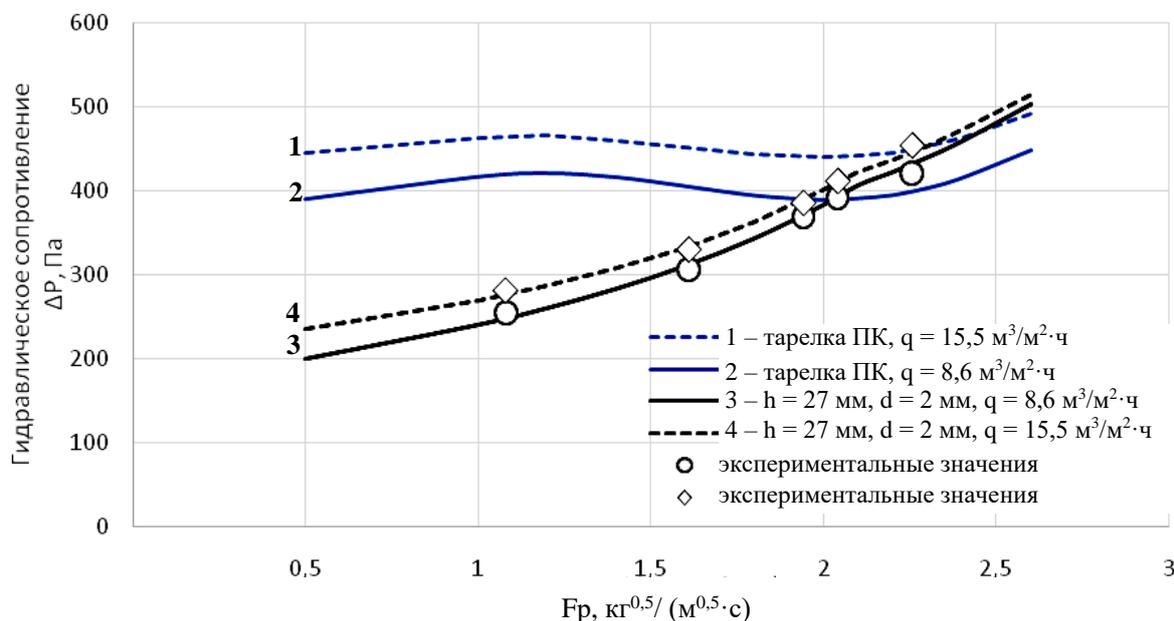


Рисунок 8. – Зависимости гидравлического сопротивления орошаемой клапанной тарелки новой конструкции (3-ый вариант колпачков) и прямооточной клапанной тарелки от фактора скорости газа

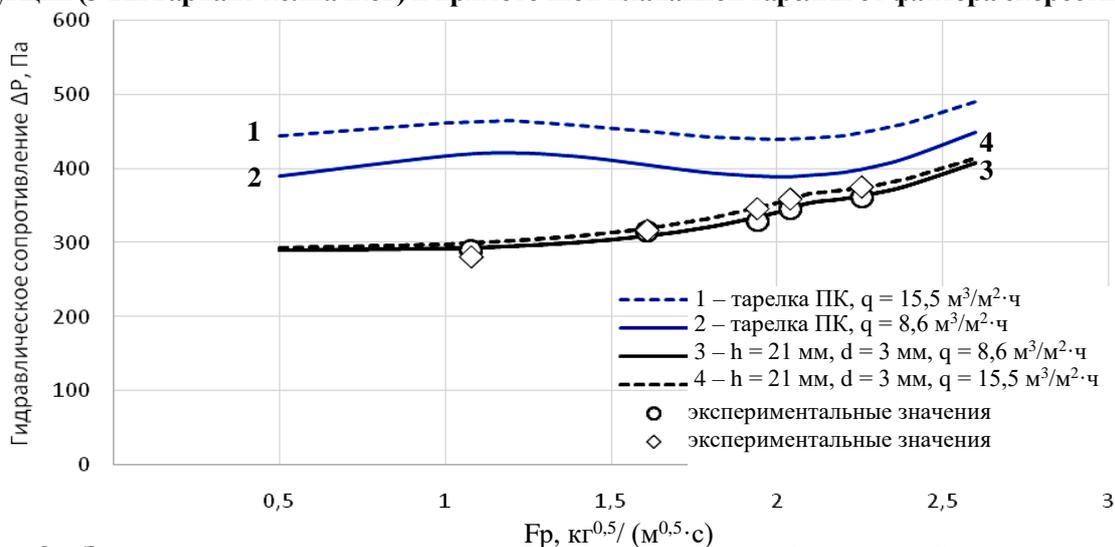


Рисунок 9. – Зависимости гидравлического сопротивления орошаемой клапанной тарелки новой конструкции (4-ый вариант колпачков) и прямооточной клапанной тарелки от фактора скорости газа

В результате сопоставления гидравлического сопротивления орошаемых тарелок – новой конструкции и прямоточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ – сделан вывод о том, что при малых значениях фактора скорости газа в режиме авторегулирования гидравлическое сопротивление орошаемых тарелок новой конструкции на 20–40% ниже, чем у прямоточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ.

Также проведено сопоставление сопротивления газожидкостного слоя тарелок новой конструкции к сопротивлению газожидкостного слоя прямоточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ. В результате сопоставления отмечено, что сопротивление газожидкостного слоя тарелок новой конструкции при низких значениях фактора скорости газа существенно ниже, чем у прямоточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ. С ростом фактора скорости газа в области саморегулирования сопротивление газожидкостного слоя клапанных тарелок новой конструкции увеличивается относительно сопротивления газожидкостного слоя прямоточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ. Переход работы тарелки в область полного открытия клапанов приводит к снижению сопротивления газожидкостного слоя клапанных тарелок новой конструкции относительно сопротивления газожидкостного слоя сопоставляемой прямоточной клапанной тарелки.

Для сопоставления величины межтарельчатого уноса клапанных тарелок новой конструкции в диссертационной работе проведено её сравнение с расчетными значениями для тарелок с дисковыми клапанами.

Расчетные значения уноса жидкости для тарелок с дисковыми клапанами определялись по уравнению:

$$e = 0,757 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{w^{2,7}}{H_T^3} \quad (10)$$

где e (кг жидкости/кг газа) – относительный унос жидкости на вышележащую тарелку;

w – скорость газа в колонне, м/с;

H_T – расстояние между тарелками, м.

На рисунках 10–13 представлены результаты сопоставления экспериментальных значений межтарельчатого уноса жидкости с тарелок новой конструкции и расчетных значений величины уноса жидкости для тарелок с дисковыми клапанами, найденными по уравнению (10).

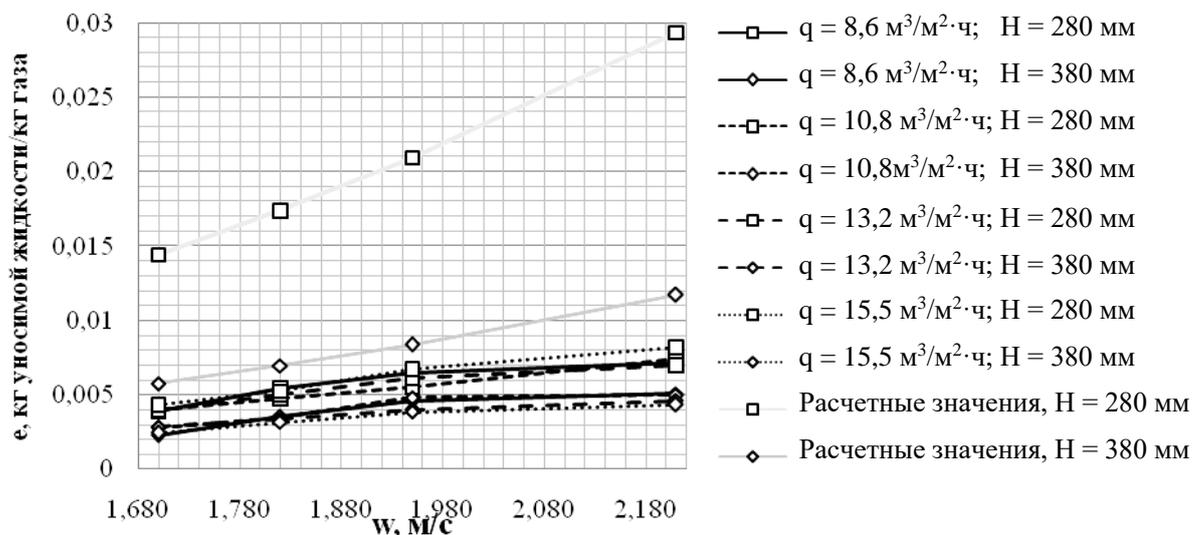


Рисунок 10. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (1-ый вариант колпачков) и с тарелок с дисковыми клапанами

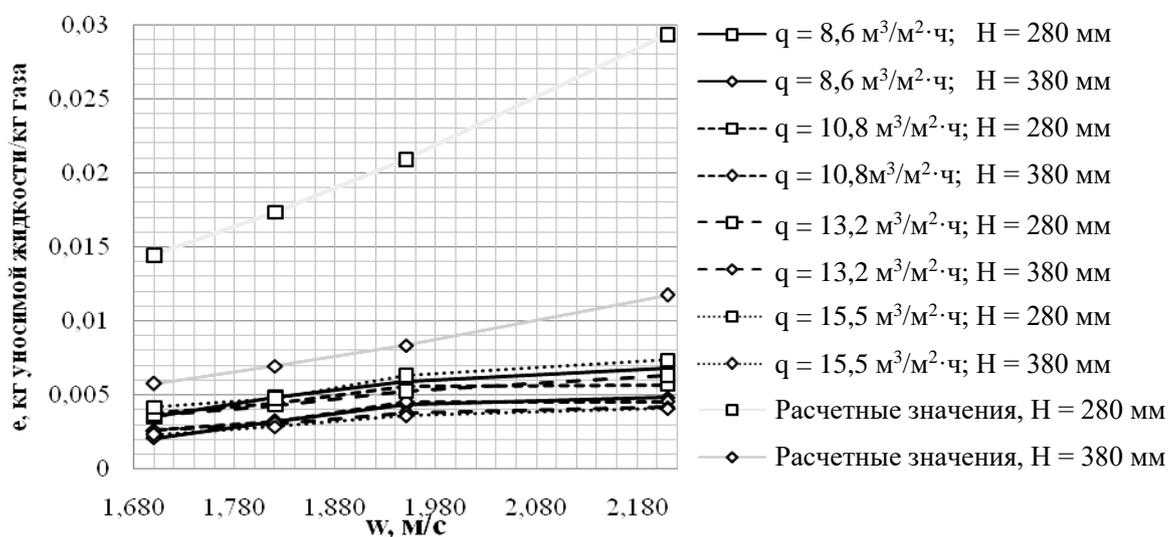


Рисунок 11. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (2-ый вариант колпачков) и с тарелок с дисковыми клапанами

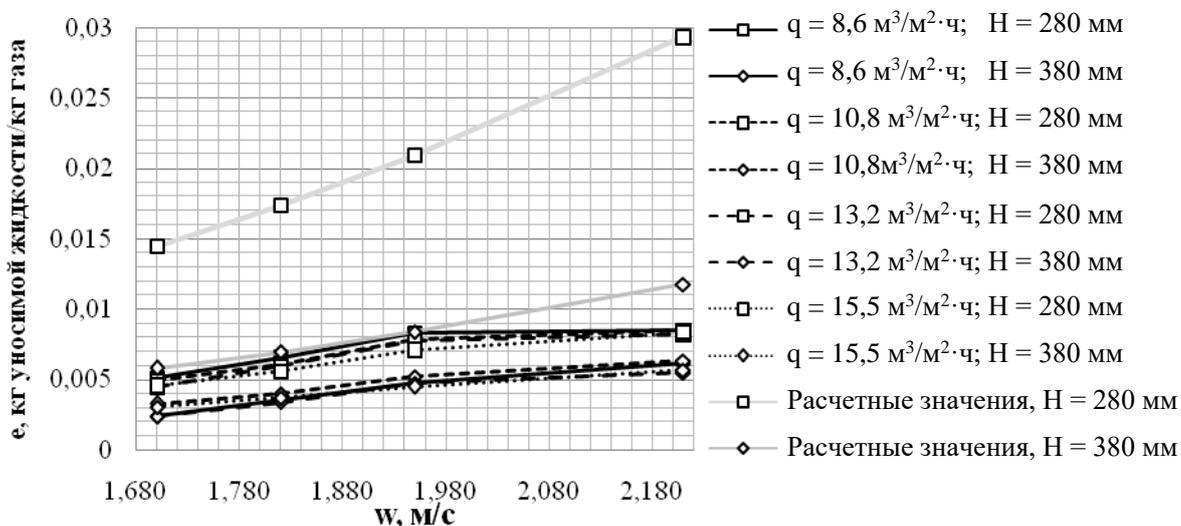


Рисунок 12. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (3-ый вариант колпачков) и с тарелок с дисковыми клапанами

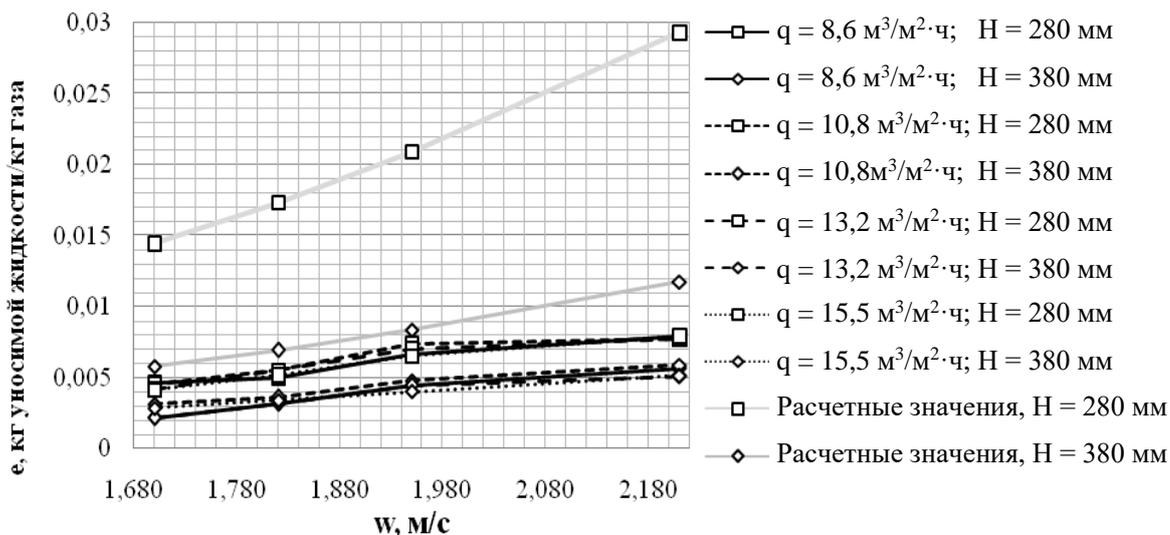


Рисунок 13. – Сопоставление величины относительного уноса жидкости с тарелки новой конструкции (4-ый вариант колпачков) и с тарелок с дисковыми клапанами

Сопоставление величины уноса жидкости с клапанной тарелки новой конструкции с расчетными значениями величины уноса жидкости для тарелок с дисковыми клапанами позволяет сделать вывод о том, что величина уноса жидкости с клапанной тарелки новой конструкции значительно меньше, чем у клапанных тарелок с дисковыми клапанами.

При сопоставлении массообменных характеристик клапанных тарелок новой конструкции и прямоточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ проводился анализ совместных графиков зависимостей эффективности массо-передачи тарелок по жидкости от фактора скорости газа (рисунки 14–17).

В результате сопоставления сделан вывод о том, что эффективность клапанных тарелок новой конструкции по жидкости во всем исследуемом диапазоне изменения факторов (интенсивность орошения тарелки, фактор скорости газа) существенно превышает эффективность прямоточной клапанной тарелки.

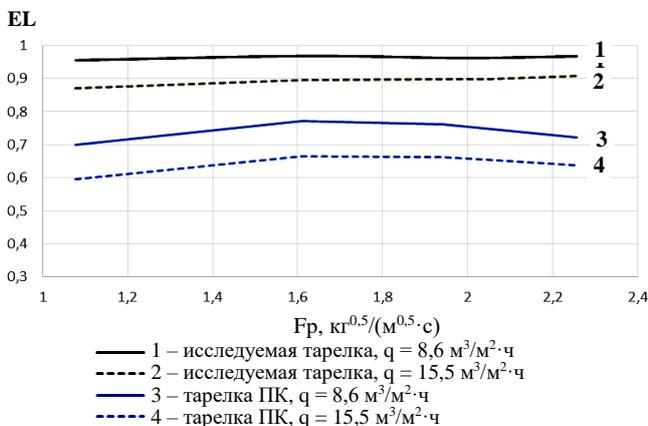


Рисунок 14. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (1-ый вариант колпачков) и прямоточной клапанной тарелки

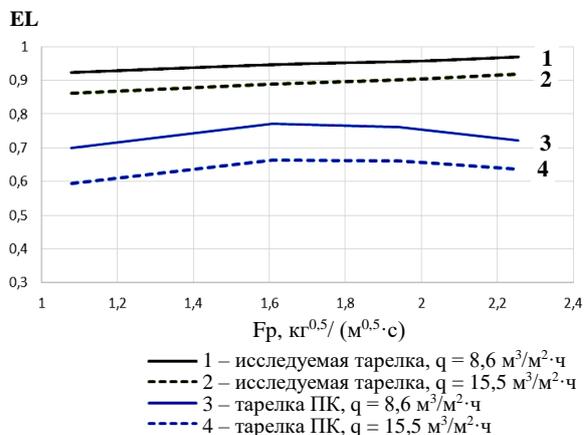


Рисунок 15. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (2-ый вариант колпачков) и прямоточной клапанной тарелки

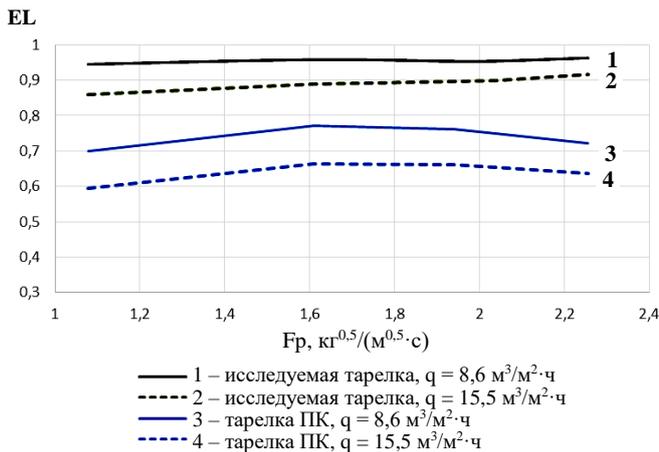


Рисунок 16. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (3-ый вариант колпачков) и прямоточной клапанной тарелки

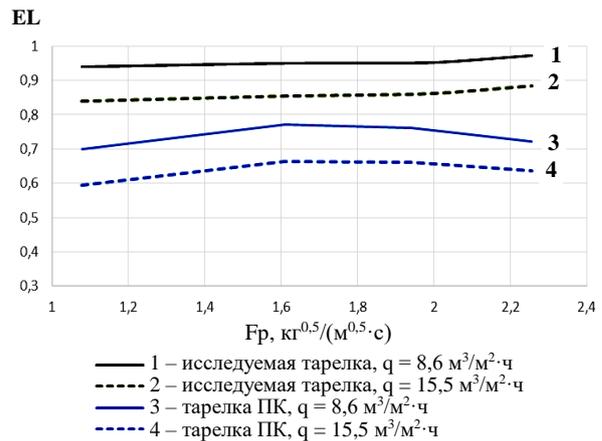


Рисунок 17. – Сопоставление эффективности клапанной тарелки новой конструкции (4-ый вариант колпачков) и прямоточной клапанной тарелки

Эффективность клапанных тарелок новой конструкции при интенсивности орошения $8,6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ в 1,24–1,35 раза выше, чем интенсивность прямоточной клапанной тарелки ВНИИНЕФТЕМАШ, а при интенсивности орошения $15,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ в 1,33–1,45 раза выше, чем интенсивность сопоставляемой прямоточной клапанной тарелки.

При сопоставлении эффективности массопередачи по газу клапанных тарелок новой конструкции с типичными значениями эффективности клапанных тарелок отмечено, что высокие значения эффективности показывают клапанные тарелки новой конструкции – их эффективность достигает 94% при насыщении воздуха влагой, в то время как эффективность стандартной клапанной тарелки не превышает 88%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе анализа физических процессов в тарельчатых аппаратах разработаны и получен патент на полезную модель конструкции контактных устройств для массообменных процессов [1-3, 9].
2. Получено выражение зависимости межтарельчатого уноса жидкости от скорости газа и расстояния между тарелками [2, 3].
3. Получена зависимость эффективности новой тарелки от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки [1, 3].
4. При сопоставлении характеристик клапанной тарелки новой конструкции и прямоточной клапанной тарелки выявлено, что:

- Клапанная тарелка новой конструкции в диапазоне саморегулирования обладает гидравлическим сопротивлением на 20–40% ниже, чем прямоточные клапанные тарелки; в диапазоне полного открытия клапанов гидравлическое сопротивление орошаемой тарелки сопоставимо с таковым для прямоточных клапанных тарелок [2, 7].
- Ширина диапазона саморегулирования клапанной тарелки новой конструкции сопоставима с шириной диапазона саморегулирования прямоточных клапанных тарелок [2, 6, 8].
- Величина уноса жидкости с клапанной тарелки новой конструкции меньше, чем у клапанных тарелок с дисковыми клапанами [3, 5].
- Эффективность разработанной клапанной тарелки по газу достигает 94%, в то время как эффективность стандартной клапанной тарелки не превышает 88% [1, 3, 4]; а её эффективность по жидкости в 1,24–1,45 раза выше, чем интенсивность прямоточной клапанной тарелки [3, 4].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Практическая значимость результатов проведенных исследований в виде разработки новых конструкций контактных массообменных устройств клапанного типа с низким гидравлическим сопротивлением и высокой эффективностью массопередачи подтверждается *актом о целесообразности внедрения* предлагаемой конструкции в ректификационных и абсорбционных колоннах ОАО «Нафтан» (г. Новополоцк), *актом о практическом использовании* (внедрении) результатов диссертационной работы в учебном процессе первой и второй ступеней образования Учреждения образования «Полоцкий государственный университет». Уравнения для расчета гидравлического сопротивления и эффективности новых контактных устройств позволяют определять габариты массообменных аппаратов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Халил, В. Б. Исследование процесса десорбции углекислого газа с использованием клапанной тарелки новой конструкции / В. Б. Халил, Д. Н. Майтам // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 3. – С. 100–104.
2. Майтам, Д. Н. Сопоставительный анализ измерения гидравлического сопротивления клапанной тарелки новой конструкции / Д. Н. Майтам // Вестн.

Полоц. гос. ун-та. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 3. – С. 110–114.

3. Майтам, Д. Н. Сопоставление основных характеристик клапанной тарелки новой конструкции и прямоточной клапанной тарелки / Д. Н. Майтам // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 111–121.

Материалы конференций

4. Al-Saedi M. The efficiency of distillation column trays and the factors that affect it / M. Al-Saedi, W. Khalil // Materials of junior researchers conference, Polotsk State University, Novopolotsk, April 27–28, 2011 : in 3 p. – Novopolotsk: PSU, 2011. – Part 1 : Technology. – P. 5–8.

5. Al-Saedi, M. The entrainment of distillation column trays / M. Al-Saedi, W. Khalil // Materials of junior researchers conference, Polotsk State University, Novopolotsk, April 22–23, 2012 : in 3 p. – Novopolotsk : PSU, 2012. – Issue 4. Part 3 : Technology. – P. 78–82.

6. Аль-Саеди, М. Д. Н. Исследование гидравлического сопротивления и эффективности новой конструкции клапанной тарелки / М. Д. Н. Аль-Саеди, В. Б. Халил, Д. И. Мисюля // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов : материалы междунар. науч.-техн. конф., 22–23 ноября 2012 г. : в 2-х ч. Ч. 1. – Минск : БГТУ, 2012. – С. 208–211.

7. Al-Saedi, M. Flooding in the column tray tray / M. Al-Saedi, W. B. Khalil // Materials of junior researchers conference, Polotsk State University, Novopolotsk, April 24–25, 2013 : in 3 p. – Novopolotsk : PSU, 2013. – Part 3 : Technology. – P. 126–129.

8. Al-Saedi, M. Research of pressure drop and efficiency of new design of valve tray / M. Al-Saedi, W. Khalil, D. Misiulia // Materials of junior researchers conference, Polotsk State University, Novopolotsk, April 22–23, 2014 : in 3 p. – Novopolotsk : PSU, 2014. – Issue 2. Part 3 : Technology. – P. 104–107.

Патенты

9. Тарелка клапанная : полез. модель ВУ 10370 / В.Б. Халил, Майтам Джабар Наджим. – Опубл. 30.10.2014.

РЭЗІЮМЭ

Аль-Саэдзі Майтам Джабар Наджым

Павышэнне эфектыўнасці масаперадачы ў апаратах з клапана-сігчатymi талеркамі

Ключавыя словы: клапанная талерка, рэктыфікацыя, абсорбцыя, масаабмен, гідраўлічнае супраціўленне, кантактныя прыстасаванні, міжтарэльчаты вынас, гідрадынамічныя характарыстыкі, эфектыўнасць талеркі.

Аб'ект даследавання – новыя кантактныя масаабменныя прыстасаванні клапаннага тыпу.

Прадмет даследавання – канструктыўныя, гідрадынамічныя і масаабменныя характарыстыкі новых кантактных масаабменных прылад клапаннага тыпу, матэматычныя мадэлі залежнасцей гідраўлічнага супраціўлення талеркі, міжтарэльчатага вынасу вадкасці і эфектыўнасці талеркі.

Мэта працы: распрацоўка новых кантактных масаабменных прыстасаванняў клапаннага тыпу, якія валодаюць высокай эфектыўнасцю і нізкім гідраўлічным супраціўленнем. Укараненне апаратаў з новымі кантактнымі прыстасаваннямі ў працэсах абсорбцыі і рэктыфікацыі.

У дысертацыйнай рабоце распрацаваны новыя канструкцыі кантактных масаабменных прыстасаванняў клапаннага тыпу, якія дазваляюць палепшыць гідрадынамічныя і масаабменныя характарыстыкі масаабменных апаратаў. Атрыманы залежнасці гідраўлічнага супраціўлення сухой і арашаемай талеркі ад фактара хуткасці газу і шчыльнасці арашэння, міжтарэльчатага вынасу вадкасці ад хуткасці газу і адлегласці паміж талеркамі, эфектыўнасці кантактных прыстасаванняў ад фактара хуткасці газу і шчыльнасці арашэння талерак, якія дазваляюць рабіць разлік прамысловых масаабменных апаратаў.

Гідраўлічнае супраціўленне арашальнай распрацаванай талеркі новай канструкцыі ў рэжыме аўтарэгулявання на 20–40% ніжэй, чым у праматочнай клапаннай талеркі, а яе эфектыўнасць ва ўсім даследаваным дыяпазоне змянення фактараў перавышае эфектыўнасць праматочнай клапаннай талеркі на 24–45%. Па велічыні міжтарэльчатага вынасу вадкасці клапанная талеркі новай канструкцыі пераўзыходзяць талеркі з дыскавымі клапанами.

Мэтазгоднасць атрыманых вынікаў пацвярджаецца актамі аб магчымасці практычнага выкарыстання вынікаў даследавання для інтэнсіфікацыі працы асноўных устаноў ААТ «Нафтан» (г. Наваполацк), якія выкарыстоўваюць рэктыфікацыйныя і абсарбцыйныя працэсы, пасля адпаведных этапаў адпрацоўкі і пацверджання вынікаў даследавання і іх апрабавання ў прамысловым маштабе.

РЕЗЮМЕ

Аль-Саэди Майтам Джабар Наджим

Повышение эффективности массопередачи в аппаратах с клапанно-ситчатыми тарелками

Ключевые слова: клапанная тарелка, ректификация, абсорбция, массообмен, гидравлическое сопротивление, контактные устройства, межтарельчатый унос, гидродинамические характеристики, эффективность тарелки.

Объект исследования – новые контактные массообменные устройства клапанного типа.

Предмет исследования – конструктивные, гидродинамические и массообменные характеристики новых контактных массообменных устройств клапанного типа, математические модели зависимостей гидравлического сопротивления тарелки, межтарельчатого уноса жидкости и эффективности тарелки.

Цель работы: разработка новых контактных массообменных устройств клапанного типа, обладающих высокой эффективностью и низким гидравлическим сопротивлением. Внедрение аппаратов с новыми контактными устройствами в процессах абсорбции и ректификации.

В диссертационной работе разработаны новые конструкции контактных массообменных устройств клапанного типа, позволяющие улучшить гидродинамические и массообменные характеристики массообменных аппаратов. Получены зависимости гидравлического сопротивления сухой и орошаемой тарелки от фактора скорости газа и плотности орошения, межтарельчатого уноса жидкости от скорости газа и расстояния между тарелками, эффективности контактных устройств от фактора скорости газа и плотности орошения тарелки, позволяющие производить расчет промышленных массообменных аппаратов.

Гидравлическое сопротивление орошаемой разработанной тарелки новой конструкции в режиме авторегулирования на 20–40% ниже, чем у прямооточной клапанной тарелки, а её эффективность во всем исследуемом диапазоне изменения факторов превышает эффективность прямооточной клапанной тарелки на 24–45%. По величине межтарельчатого уноса жидкости клапанные тарелки новой конструкции превосходят тарелки с дисковыми клапанами.

Целесообразность полученных результатов подтверждается актом о возможности практического использования результатов исследования для интенсификации работы основных установок ОАО «Нафтан» (г. Новополоцк), использующих ректификационные и абсорбционные процессы, после соответствующих этапов отработки и подтверждения результатов исследования и их апробации в промышленном масштабе.

SUMMARY

Al-Saedi Maitham Jabbar Najm

**Increasing of the efficiency of a mass transfer in apparatus
with valve-sieve trays**

Keywords: valve collar, rectification, absorption, mass transfer, hydraulic resistance, contact devices, intercollar entertainment, hydrodynamic characteristics, collar efficiency.

The object of the study: new valve-type contact mass transfer devices.

The subject of the study: the constructive, hydrodynamic and mass transfer characteristics of new valve-type contact mass transfer devices, mathematical models of the dependences of the collar hydraulic resistance, the intercollar fluid entertainment and the efficiency of the collar.

The aim of work: Development of new contact mass transfer devices of valve type, which have high efficiency and low hydraulic resistance. The introduction of devices with new contact devices in the absorption and rectification processes.

In the dissertation research new designs of contact mass transfer devices of valve type have been developed, which make it possible to improve the hydrodynamic and mass-transfer characteristics of mass transfer devices. The dependences of the hydraulic resistance of a dry and irrigated collar on the gas velocity factor and the density of irrigation, the intercollar entertainment on the gas velocity and the distance between collars, the efficiency of the contact devices on the gas velocity factor, and the irrigation density of the collar, allowed to make the calculation of industrial mass transfer devices are obtained.

The hydraulic resistance of the irrigated, newly developed collar in the auto-regulating mode is 20–40% lower than the direct-flow valve collar, and their efficiency in the entire investigated range of change factors exceeds the efficiency of the direct-flow valve collar by 24–45%. In terms of the value of the intercollar liquid entrainment, the new-design valve collars outperform collars with disc valves.

The expediency of the received results is confirmed by the act of a possibility of practical use of results of a research for an intensification of work of the main plants of JSC Naftan (Novopolotsk), which is using rectification and absorption processes, after the corresponding stages of practices and confirmation of results of a research and their approbation in the commercial scale.

Научное издание

АЛЬ-САЭДИ Майтам Джабар Наджим

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАССОПЕРЕДАЧИ
В АППАРАТАХ С КЛАПАННО-СИТЧАТЫМИ ТАРЕЛКАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.17.08 – процессы и аппараты химической технологии

Подписано в печать 16.05.2018. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,17. Тираж 60. Заказ 601.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.