

На правах рукописи



Везиров Исмагил Рустемович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНОЙ ПЕРЕГОНКИ
МАЗУТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ
ГИДРОЭЖЕКТОРНЫХ ВАКУУМСОЗДАЮЩИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.17.07 – «Химическая технология топлива и
высокоэнергетических веществ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа 2018

Работа выполнена на кафедре «Технология нефти и газа» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель **Теляшев Эльшад Гумерович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» / кафедра «Газохимия и моделирование химико-технологических процессов», заведующий кафедрой

Официальные оппоненты: **Теляков Эдуард Шархиевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» / кафедра «Машины и аппараты химических производств», профессор

Григорян Леон Гайкович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» / кафедра «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств», профессор

Ведущая организация Публичное акционерное общество «Средневожский научно-исследовательский институт по нефтепереработке» (ПАО СвНИИ НП)
(г. Новокуйбышевск)

Защита диссертации состоится 5 декабря 2018 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан « _____ » _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Абдульминев Ким Гимадиевич

Актуальность темы исследования

На нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) в процессе первичной переработки нефти осуществляется вакуумная перегонка мазута. Основными продуктами процесса являются дизельное топливо (вакуумный соляр), высокоценный вакуумный газойль или масляные фракции и остаточный продукт - гудрон. Одним из ключевых факторов, влияющих на отбор вакуумных дистиллятов, является остаточное давление в вакуумной колонне, особенно в зоне ее питания. Меньшее остаточное давление в зоне питания позволяет достичь высокой доли отгона и необходимого отбора газойлевых фракций при более низкой температуре мазута на выходе из печи вакуумной колонны. Это обеспечивает снижение тепловой нагрузки на печь, расхода топлива, количества продуктов разложения высококипящих фракций, интенсивности закоксовывания змеевика печи и, как следствие, увеличение межремонтного пробега установки и повышение экономической эффективности процесса. Снизить остаточное давление в вакуумной колонне возможно путем снижения нагрузки на вакуумсоздающую систему (ВСС) и повышения её КПД (эффективности). Нагрузка на ВСС снижается за счёт меньшей температуры верха колонны, а также установки конденсаторов перед ней. Типовые установки вакуумной перегонки мазута снабжены многоступенчатыми паровыми ВСС. На некоторых российских НПЗ паровые ВСС были заменены на одноступенчатые гидроэжекторные, обладающие большей эффективностью, а также более экологичные. Однако основной проблемой существующих одноступенчатых гидроэжекторных ВСС, которая ограничивает достижимое остаточное давление, является повышение давления насыщенных паров рабочей жидкости из-за накопления в ней газов, легких углеводородов и, особенно, эмульгированной воды. Данная проблема решается путем обновления циркулирующей рабочей жидкости, что требует большого расхода свежей рабочей жидкости (подпитки) и увеличивает энергозатраты на регенерацию отработанного балансового избытка (распитки).

Вышеизложенное свидетельствует об актуальности проблемы и обусловило выбор темы исследования.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в изучение и решение задачи совершенствования технологии вакуумной перегонки мазута внесли следующие учёные: С.Г. Рогачев, О.Ф. Глаголева, Г.Г. Теляшев, Ф.А. Арсланов. Труды содержат фундаментальные основы по определению количества откачиваемых газов из вакуумной колонны, методике расчёта основных технологических параметров гидроэжекторных ВСС, в том числе многоступенчатых, аппаратурному оформлению вакуумных колонн и гидроэжекторных ВСС. В перечисленных работах не рассматривалась технология вакуумной перегонки мазута без подачи водяного пара с использованием двухступенчатой гидроэжекторной ВСС.

Соответствие паспорту специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формуле специальности 05.17.07: фундаментальные и прикладные исследования в области химии и технологий переработки жидких, газообразных и твердых топлив, в том числе нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов, газа, каменных углей, сланцев, торфа и продуктов их переработки, природных графитов, шунгитов, природных битумов. В состав специальности также входит синтез и технологии специальных продуктов с повышенной эффективностью действия и эксплуатационной надежностью (п. 2).

Цель работы заключается в совершенствовании технологии вакуумной перегонки мазута за счёт повышения эффективности гидроэжекторных вакуумсоздающих систем.

Задачи исследований

1 Обследование и сбор опытно-промышленных данных о работе существующих вакуумных блоков российских НПЗ с гидроэжекторными вакуумсоздающими системами для разработки методики расчета и компьютерного моделирования.

2 Определение влияния основных технологических параметров на эффективность работы гидроэжекторных систем.

3 Разработка гидроэжекторной системы, обеспечивающей удаление эмульгированной воды из циркулирующей рабочей жидкости.

4 Разработка методики расчета и определения оптимальных технологических параметров двухступенчатой гидроэжекторной системы создания вакуума.

5 Разработка технологии вакуумной перегонки мазута без подачи водяного пара с использованием двухступенчатой гидроэжекторной вакуумсоздающей системой.

Научная новизна

1 Доказано определяющее влияние содержания воды в рабочей жидкости гидроэжекторной вакуумсоздающей системы на достижимое остаточное давление.

2 Впервые установлен экстремальный характер зависимости расхода рабочей жидкости от температуры в двухступенчатой гидроэжекторной вакуумсоздающей системе: минимальный расход рабочей жидкости достигается при доле обновления рабочей жидкости 8 – 16 % масс. и температуре 40 – 55 °С.

3 Впервые разработана технология создания вакуума двухступенчатой гидроэжекторной системой, обеспечивающая остаточное содержание воды в суммарной рабочей жидкости не более 0,02 % масс.

4 Впервые разработана технология вакуумной перегонки мазута без подачи водяного пара с применением двухступенчатой гидроэжекторной системы создания вакуума.

Теоретическая и практическая значимость работы

1 Результаты обследования и сбора опытно-промышленных данных могут быть использованы в технологических расчетах вакуумных блоков перегонки мазута с гидроэжекторными системами.

2 Разработанная технологическая схема двухступенчатой гидроэжекторной вакуумсоздающей системы может использоваться при разработке перспективных схем вакуумной перегонки мазута.

3 Определены технологические параметры двухступенчатой гидроэжекторной системы, обеспечивающие наименьший расход рабочей жидкости.

4 Обоснована экономическая и энергетическая эффективность технологии вакуумной перегонки мазута без подачи водяного пара с двухступенчатой гидроэжекторной системой, обеспечивающая снижение удельных затрат на дистилляты более чем на 70 %, а удельных энергозатрат более чем на 40 %.

Методология и методы исследования

В работе использованы следующие методы исследования: анализ, аналогия, обобщение, системный метод, наблюдение, сравнение, моделирование.

Основные результаты, выносимые на защиту

1 Результаты экспериментальных исследований и анализа опытно-промышленных данных о работе существующих блоков вакуумной перегонки мазута с гидроэжекторными системами создания вакуума, доказывающие необходимость снижения содержания воды в циркулирующей рабочей жидкости.

2 Технологические параметры двухступенчатой гидроэжекторной вакуумсоздающей системы, обеспечивающие минимальный расход рабочей жидкости.

3 Принципиальная схема двухступенчатой гидроэжекторной системы, обеспечивающей остаточное содержание воды в суммарной рабочей жидкости не более 0,02 % масс.

4 Обоснование экономической и энергетической эффективности технологии вакуумной перегонки мазута без подачи водяного пара с двухступенчатой гидроэжекторной системой.

Реализация и внедрение результатов работы

1 Разработана установка вакуумной перегонки мазута без подачи водяного пара с двухступенчатой гидроэжекторной вакуумсоздающей системой в рамках договора между ГУП ИНХП РБ и Афипским НПЗ.

2 Разработанная методика расчёта гидроэжекторной ВСС может использоваться в учебном процессе студентов и аспирантов ФГБОУ ВО «УГНТУ».

Апробация работы

Результаты работы представлены в материалах международных научно-практических конференций «НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКА - 2013, 2016» (г. Уфа).

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 15 публикациях, в том числе 5 статьях, опубликованных в научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 7 патентах на изобретение, а также в трех материалах международных научно-практических конференций.

Личный вклад

Все представленные в диссертации результаты расчетов и экспериментов получены при участии автора. Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач, планировании экспериментов и проведении расчетов. Обработка полученных результатов расчетов, их анализ и подготовка к публикации в статьях и конференциях проводились совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим.

Разработка новой технологии вакуумной перегонки мазута и непосредственно конструкции двухступенчатой гидроэжекторной ВСС проводилась совместно с соавторами соответствующих патентов.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников. Общий объем диссертации составляет 132 страницы, 14 таблиц, 43 рисунка. Список использованной литературы содержит 151 источник.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается современный уровень технического развития вакуумных блоков установок АВТ. Представлены различные типы ВСС, дан анализ их работы, рассмотрены конструктивные и технологические особенности, преимущества и недостатки каждого типа ВСС, отмечен наиболее распространенный тип ВСС. Предложены технические решения по совершенствованию конструкций вакуумных блоков. Представлены современные высокоэффективные противоточные и перекрестноточные контактные устройства насадочного типа, обеспечивающие низкий перепад давления в колонне.

Во второй главе представлены результаты обследования вакуумных блоков шести установок АВТ, оснащенных одноступенчатыми гидроэжекторными ВСС, а также расчетных анализов полученных данных. Результаты обследования приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Технологические параметры работы вакуумных блоков с одноступенчатыми гидроэжекторными ВСС

Наименование параметра	Значение параметра по установкам					
	НПЗ - 1	НПЗ - 2	НПЗ - 3	НПЗ - 4	НПЗ - 5	НПЗ - 6
Загрузка вакуумного блока, млн. т/год	3,0 ÷ 3,5	1,5 ÷ 1,7	3,0 ÷ 3,5	2 ÷ 2,5	3,5 ÷ 4,5	3,0 ÷ 3,5
Остаточное давление перед ВСС, мм рт. ст.	60 ÷ 80	45 ÷ 50	32 ÷ 40	35 ÷ 40	30 ÷ 35	32 ÷ 35
Температура мазута на выходе из печи, °С	400 ÷ 405	400	390	395	398	385
Расход водяного пара в куб колонны, т/ч	3,5 ÷ 4	2	2 ÷ 2,5	2 ÷ 2,5	4 ÷ 4,5	–
Кол-во конденсаторов/ Σ пов-ть, м ³	3 / 4500	2 / 1860	3 / 4500	3 / 3570	8 / 9520	3 / 4500
Кол-во стояков	2	1	2	2	1	2
Кол-во сепараторов	1	1	1	2	1	2
Расход рабочей жидкости, м ³ /ч	400 ÷ 450	200 ÷ 220	400 ÷ 450	200 ÷ 220	540 ÷ 560	400 ÷ 450
Подпитка рабочей жидкости, м ³ /ч	50 ÷ 70	20 ÷ 30	40 ÷ 60	20 ÷ 30	20 + 60	40 ÷ 60
Расход оборотной воды на вакуумный блок, м ³ /ч	1800	500	1000	450	2600	1000
Температура оборотной воды, °С	25	25	10	15	20	25

Из представленных данных следует, что большое влияние на создаваемое остаточное давление оказывает температура охлаждения парогазовой смеси (ПГС) из вакуумной колонны в конденсаторах перед ВСС. В приведенных примерах (кроме НПЗ 6) большую часть ПГС составляет водяной пар, поэтому получаемый вакуум не может быть ниже давления насыщенного водяного пара при температуре в конденсаторах, так как по мере приближения остаточного давления к давлению насыщенного водяного пара конденсат начинает закипать, увеличивая нагрузку на ВСС. Это приводит к значительному увеличению энергозатрат на создание вакуума. На рисунке 1 приведены результаты расчетов зависимости доли конденсирующихся компонентов ПГС (при перегонке с водяным паром) от температуры при различных давлениях. Из графика следует, что при снижении остаточного давления в конденсаторах значительно снижается доля конденсирующихся компонентов ПГС. Так, при температуре 30 °С и остаточном давлении 50 мм рт. ст. доля конденсации в конденсаторе составляет 0,78, а при 30 мм рт. ст. – 0,2, т.е. эффективность конденсации снижается в 3,9 раз и, соответственно, увеличивается нагрузка на ВСС. Снижение температуры ниже 15°С нецелесообразно, так как оставшаяся газовая фаза в основном состоит из неконденсируемых (при этих условиях) газов разложения.

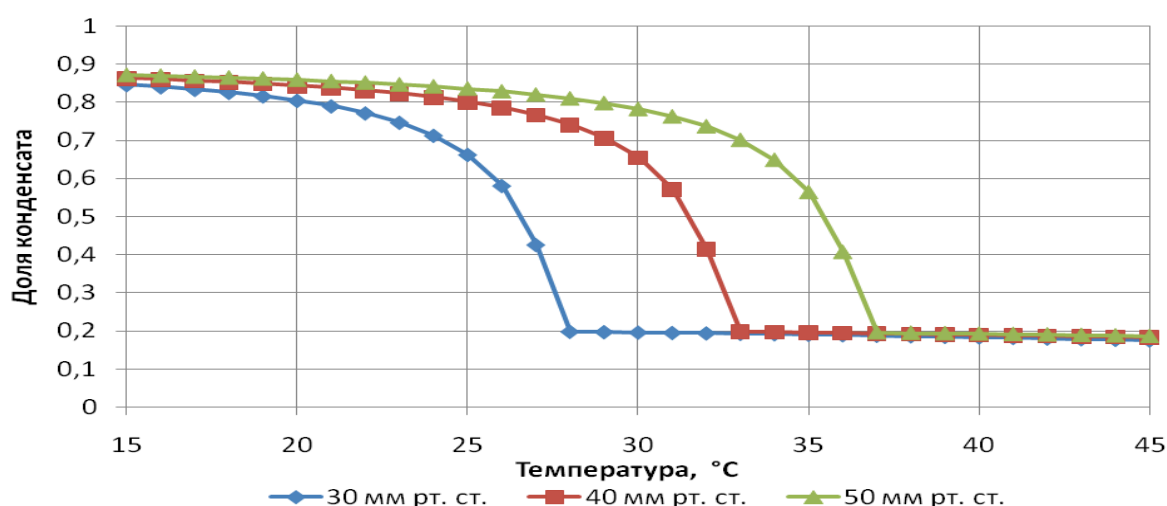


Рисунок 1 - Зависимость доли конденсируемых компонентов от температуры

Из таблицы 1 следует, что при обычных условиях (температура охлаждающей воды ~ 25 °С) одноступенчатые гидроэжекторные ВСС

обеспечивают остаточное давление в вакуумной колонне не ниже 45 мм рт. ст. (НПЗ 1 и 2). Более глубокий вакуум (30 - 40 мм рт. ст.) достигается только при использовании низкотемпературных хладагентов. Так, на НПЗ 3, 4 и 5 используется оборотная вода с температурой соответственно 10, 15 и 20 °С. На НПЗ 3 температура оборотной воды, подаваемой в конденсаторы, обеспечивается за счёт специальной холодильной машины. На НПЗ 4 и 5 температура оборотной воды 15 и 20 °С соответственно обеспечивается за счёт модернизации установок водоснабжения. Кроме того на вакуумном блоке НПЗ 5 используется современное и более эффективное оборудование по сравнению с другими предприятиями, в частности, 8 конденсаторов перед ВСС. Также на НПЗ 5 в конденсаторы подается значительно большее количество оборотной воды. Следует отметить, что, как правило, температура ПГС после конденсатора на 5 - 10 °С выше, чем у подаваемой охлаждающей воды, поэтому фактические данные отличаются от расчётных в худшую сторону. Вакуумный блок НПЗ 6 изначально был рассчитан на перегонку с водяным паром, но впоследствии переведён на режим «сухой» перегонки без изменения режима работы ВСС: ПГС из вакуумной колонны сначала подается в конденсаторы, а затем в ВСС. Это обеспечивает остаточное давление в вакуумной колонне в диапазоне 32 - 35 мм рт. ст.

Также установлено, что значительное влияние на создаваемый вакуум оказывает содержание компонентов ПГС в циркулирующей рабочей жидкости (РЖ). В камере смешения струйного аппарата (эжектора) с низким давлением происходит выделение из РЖ растворенных в ней парогазовых компонентов (балластный газ), вследствие чего снижается эффективность струйного аппарата и его производительность по объему откачиваемой ПГС. При охлаждении РЖ снижается давление её насыщенных паров (ДНП), следовательно, в камере смешения эжектора выделяется меньшее количество растворенных парогазовых компонентов, повышается эффективность эжектора и углубляется создаваемый вакуум. Охлаждение РЖ ограничено температурой охладителя (оборотной воды). Также при снижении температуры РЖ в ней конденсируется и абсорбируется большее количество компонентов откачиваемой ПГС. Их накопление приводит к

повышению ДНП РЖ. Однако, повышение температуры РЖ также не предотвращает конденсацию и накопление компонентов ПГС в РЖ и, следовательно, повышение её ДНП.

Промышленный опыт работы одноступенчатых гидроэжекторных ВСС показал, что, наиболее эффективным является следующий режим работы. РЖ охлаждается до минимально возможной температуры (30 - 35 °С) для облегчения работы струйных аппаратов и конденсации большей части компонентов откачиваемой ПГС. Затем в сепараторах происходит удаление газов и сконденсировавшейся водной фазы. Для повышения эффективности обезвоживания РЖ, сепаратор может быть снабжен коалесцером, который обеспечивает удаление мелких капель воды. Снижение содержания воды и легких углеводородов в РЖ после сепаратора осуществляется за счёт её обновления путем подачи подпитки и вывода распитка.

Доля подпитки обычно составляет около 15 % масс. от общего количества циркулирующей РЖ. Увеличение подпитки ограничено наличием её необходимого количества, а также увеличением энергозатрат на регенерацию распитки. На НПЗ 5 для снижения расхода подпитки ВСС была снабжена дополнительной аминовой ВСС для дегазации РЖ. С помощью аминовой ВСС создается вакуум в вакуумном десорбере (остаточное давление 60 - 100 мм рт. ст.), куда подается часть циркулирующей РЖ. После вакууммирования в десорбере дегазированная РЖ возвращается обратно в контур циркуляции. Это позволило снизить долю подпитки до 9 %, но не оказало влияния на создаваемый вакуум.

На полупромышленном экспериментальном стенде были проведены исследования, определяющие максимально возможную глубину создаваемого вакуума гидроэжекторной ВСС. Для этого в специальный струйный аппарат с несколькими точками отбора давления (для повышения точности измерений) и герметичной камерой смешения под давлением подавалась РЖ. В качестве РЖ на экспериментальном стенде использовался керосин ТС-1 – нефтепродукт, обладающий большим давлением насыщенных паров, чем обычно применяемые

дизельное топливо, вакуумный соляр или легкий вакуумный газойль. Несмотря на это, в камере смешения обеспечивалось остаточное давление менее 10 мм рт. ст. даже при температуре рабочей жидкости 40 °С. Из экспериментальных данных следует, что даже более легкой рабочей жидкостью, не содержащей компонентов ПГС, возможно создать остаточное давление менее 10 мм рт. ст. (рисунок 2).

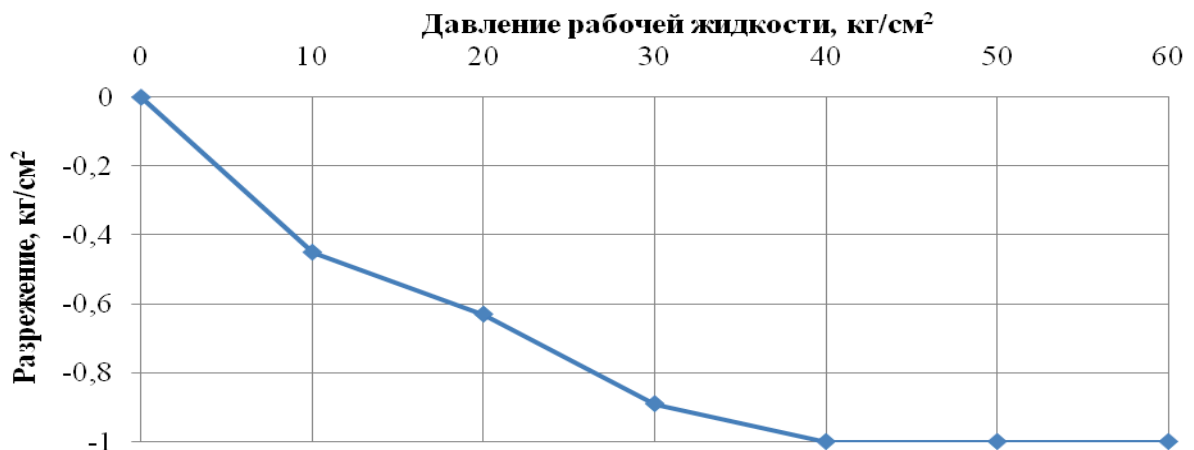


Рисунок 2 – Зависимость разрежения в камере смешения от давления рабочей жидкости

Обследование работы ВСС на НПЗ 6 показало, что, несмотря на «сухой» режим работы, в ПГС, откачиваемой из вакуумной колонны, присутствует некоторое количество водяного пара, который попадает в вакуумную колонну вместе с мазутом. После пуска вакуумного блока и подачи мазута остаточное давление в вакуумной колонне повышается до тех пор, пока в сборнике конденсата сепаратора не появляется отдельная фаза воды (32 - 35 мм рт. ст. на НПЗ-6).

Из литературных данных известно, что содержание растворенной воды в дизельных фракциях составляет не более 0,05 % масс. Однако анализ проб рабочей жидкости гидроэжекторных ВСС, приведенных в таблице 1, показывает, что в сепараторах, даже снабженных коалесцерами, содержание воды в рабочей жидкости составляет 0,15 - 0,3 % масс. Это объясняется неполным удалением эмульгированной воды. В среде моделирующей программы HYSYS была

определена зависимость создаваемого остаточного давления от содержания воды и температуры РЖ, насыщенной углеводородными газами (рисунок 3).

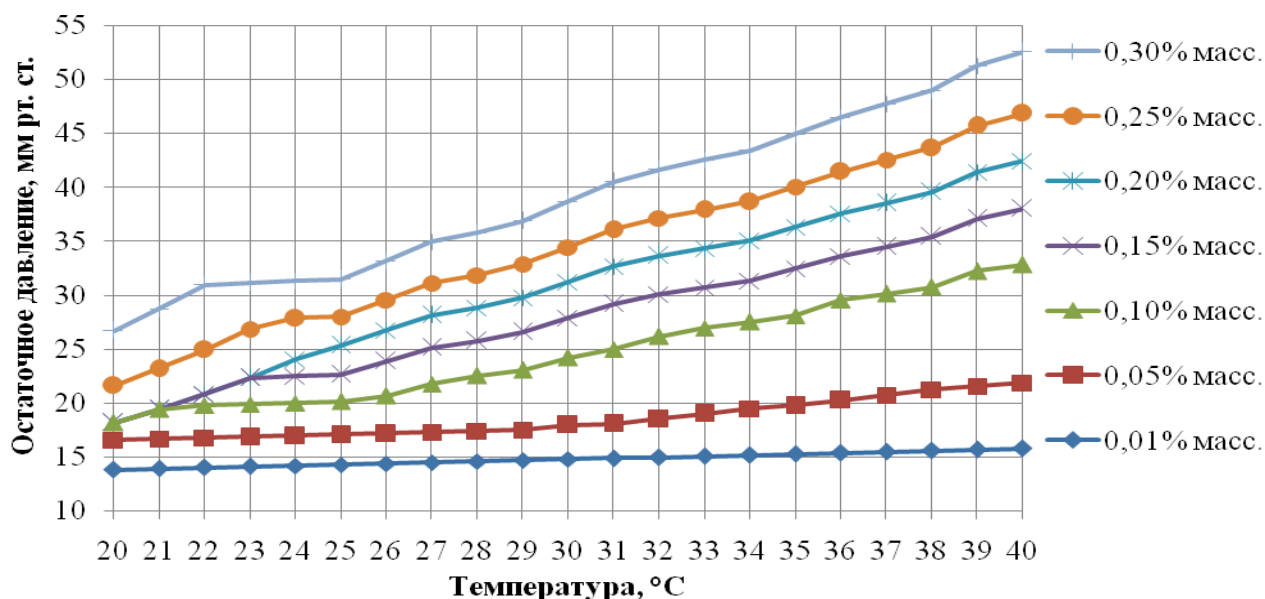


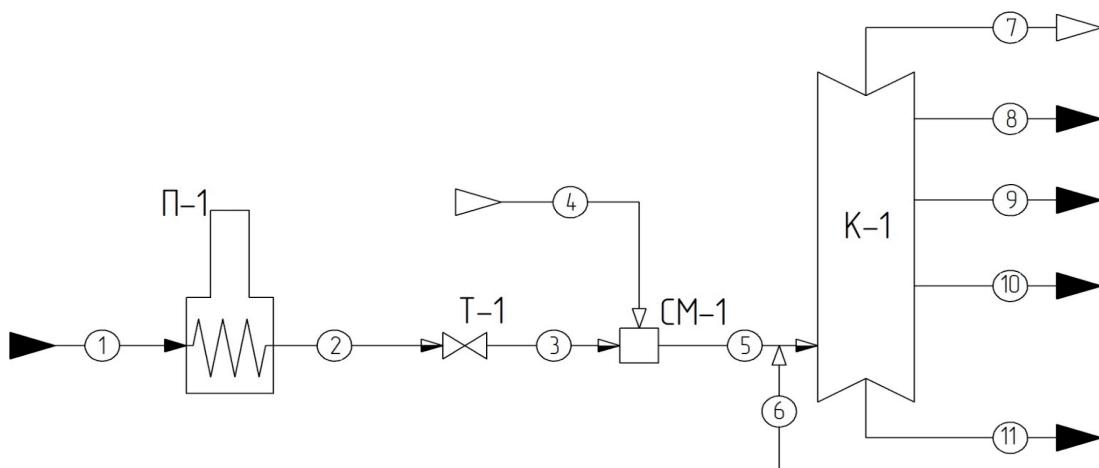
Рисунок 3 - Зависимость создаваемого остаточного давления от температуры насыщенной рабочей жидкости и содержания воды в ней

Из результатов экспериментальных исследований, а также данных о работе вакуумных блоков установок АВТ следует, что основным ограничителем глубины достигаемого вакуума на существующих одноступенчатых гидроэжекторных ВСС является содержание воды в циркулирующей РЖ. Для создания остаточного давления менее 30 мм рт. ст. необходимо обеспечивать содержание в ней воды не более 0,05 %.

В третьей главе представлены основные принципы расчетного моделирования вакуумного блока перегонки мазута и гидроэжекторной ВСС, приведены результаты разработки и исследования гидроэжекторной технологии создания вакуума с помощью компьютерного моделирования на основе опытно-промышленных данных.

Моделирование расчетной схемы производилось в средах универсальных моделирующих программ (HYSYS, Pro-II и т.д.). При расчетах и определении нагрузки на ВСС была принята расчетная схема вакуумного блока, представленная на рисунке 4. Интенсивность процесса термодеструкции (крекинг

сырья и образование газов разложения) и, соответственно, нагрузку на ВСС в значительной мере определяет температура нагрева сырья в вакуумной печи. Газы разложения практически полностью выводятся вместе с ПГС с верха вакуумной колонны. Так как процесс термодеструкции компонентов мазута является динамическим, а расчетная модель статической, то количество газов разложения задается вручную (поток 4 рисунка 4).



П-1 - вакуумная печь; Т-1 - трансферная линия; СМ-1 - смеситель; К-1 - вакуумная колонна, 1 - сырье (мазут); 2 - газожидкостная смесь (ГЖС) на входе в трансфер; 3 - газосырьевая смесь на выходе из трансфера; 4 - газы разложения; 5 - сырье колонны; 6 - подсос воздуха; 7 - парогазовая смесь из вакуумной колонны; 8 - вакуумный соляр; 9 - легкий вакуумный газойль; 10 - тяжелый вакуумный газойль; 11 - гудрон

Рисунок 4 - Расчетная схема печи, трансферной линии и вакуумной колонны

Для большей точности расчет количества газов разложения выполнялся по различным методикам. Одной из них является инструкция по эксплуатации моделирующей системы Pro-II (фирма Simulation Sciences Inc. USA), в которой приведены зависимости для определения количества образующихся газов. В других источниках даны графики зависимости выхода газов разложения от температуры нагрева сырья.

Расчёт гидроциркуляционных вакуумных эжекторов осуществлялся с помощью специализированных модулей расчёта, которые включены в соответствующие моделирующие системы.

Исходя из законов сохранения массы, энергии, импульса, с помощью специализированного программного расчётного модуля, скорректированного с учетом уравнений, а также опытно-промышленных данных построена расчетная модель ступени (эжектор + сепаратор) гидроэжекторной ВСС.

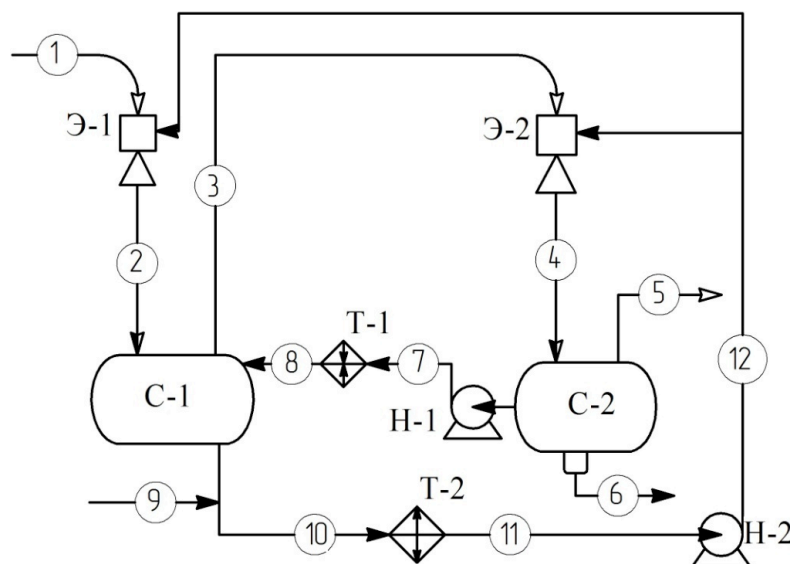
Основными показателями работы струйных аппаратов гидроэжекторных ВСС являются степень сжатия, объемный и массовый коэффициент эжекции. При расчете эжекторов для глубоковакуумных ВСС большее значение приобретает объемный коэффициент эжекции, вследствие значительного увеличения объема откачиваемой ПГС. Так, при снижении остаточного давления с 30 до 10 мм рт. ст. и неизменном отборе дистиллятов в вакуумной колонне массовый расход ПГС снижается за счёт меньшей температуры нагрева, а объемный расход возрастает более чем в 4 раза. Следовательно, основным фактором, определяющим эффективность вакуумных струйных аппаратов, является объемный коэффициент эжекции, что учитывается коэффициентом K в уравнениях 3 и 4.

Из термодинамики известно, что энергетически наиболее выгодно многоступенчатое сжатие газов с одинаковой степенью сжатия на каждой ступени. В многоступенчатых гидроэжекторных ВСС оптимальное остаточное давление между ступенями определяется так же, как и степень сжатия каждой ступени в многоступенчатых компрессорах по известным уравнениям.

После определения оптимального остаточного давления в сепараторе первой ступени по уравнению (5) рассчитывается количество РЖ, необходимое для откачки и компримирования ПГС, выводимой из сепараторов первой и второй ступеней. Расчетная схема двухступенчатой ВСС представлена на рисунке 5.

Расход РЖ во вторую ступень меньше, так как объем ПГС, откачиваемой во вторую ступень при большем давлении, значительно меньше, чем в первую. Таким образом, доля компонентов ПГС в газожидкостной смеси, поступающей в сепаратор второй ступени, больше, чем в первой. Поэтому облегчается выделение

откачиваемых компонентов из РЖ, уменьшается время, необходимое для сепарации, а также требуемый для этого объем сепаратора. Из сепаратора второй ступени вместе с водной фазой выводится также распитка. РЖ второй ступени после сепарации возвращается в вакуумный сепаратор первой ступени. Суммарная вакуумированная РЖ выводится из сепаратора и, после добавления подпитки, охлаждается в теплообменном аппарате до необходимой температуры и подается на прием насоса. Преимущество двухступенчатой ВСС заключается в том, что в струйные аппараты обеих ступеней подается РЖ из сепаратора первой ступени со значительно меньшим давлением насыщенных паров, чем в одноступенчатых ВСС.



Э-1, Э-2 - эжекторы первой и второй ступени; С-1, С-2 - сепараторы первой и второй ступени; Н-1,2 - насосы; Т-1,2 - теплообменные аппараты; 1 - ПГС из вакуумной колонны; 2 - ГЖС; 3 - ПГС из сепаратора первой ступени; 4 - ГЖС; 5 - ПГС на утилизацию; 6 - распитка; 7 - возврат рабочей жидкости; 8 - подогретая РЖ; 9 - подпитка; 10, 11 - РЖ до и после охлаждения; 12 - РЖ в эжекторы

Рисунок 5 - Расчетная схема двухступенчатой ВСС

Температура РЖ подбирается из условия минимизации её расхода. На рисунке 7 приведен график зависимости расхода РЖ от её температуры и количества подпитки. Расчет выполнен для двухступенчатой гидроэжекторной

ВСС вакуумного блока мощностью 3 млн т/год по мазуту (сухая перегонка). Из графиков следует, что каждому режиму работы ВСС соответствует свой минимальных расход РЖ. При снижении температуры ниже оптимальной расход РЖ возрастает. Это происходит из-за увеличения количества растворенных компонентов ПГС в суммарной РЖ за счёт их конденсации и абсорбции в сепараторе первой ступени. Снижение температуры РЖ ниже 35 °С приводит к резкому увеличению её расхода во всех режимах, так как происходит конденсация водяного пара в сепараторе первой ступени и накопление воды в суммарной РЖ. При увеличении температуры выше оптимальной также происходит увеличение расхода РЖ из-за снижения эффективности струйных аппаратов, так как при повышении температуры происходит увеличение объема паров, сжимаемых в струйных аппаратах.

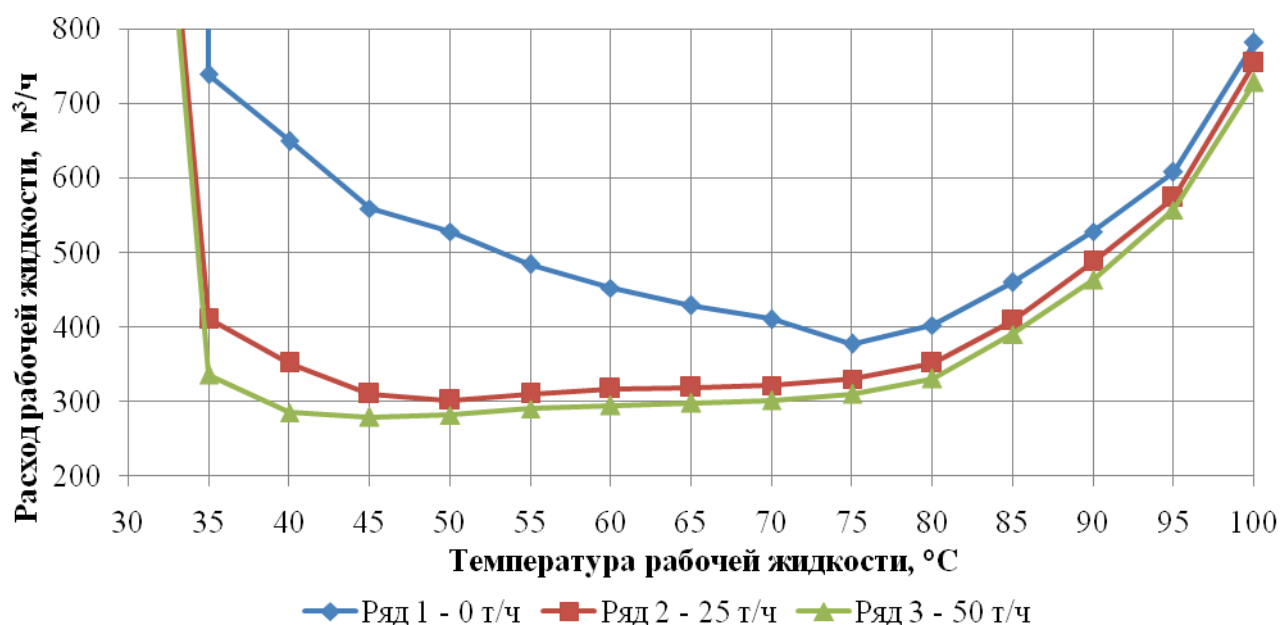


Рисунок 6 - Зависимость расхода рабочей жидкости от температуры и расхода подпитки

Расчеты показывают, что оптимальный режим работы системы обеспечивается при подаче ~8 % подпитки и температуре РЖ 50 °С (ряд 2 на рисунке 6). При температуре РЖ выше или равной оптимальной содержание воды в суммарной РЖ не превышает 0,02 % масс.

Из литературных данных известно, что чем выше давление РЖ, тем выше эффективность струйных аппаратов и меньше необходимый расход. Однако увеличение давления приводит к увеличению потребляемой мощности насосов. На рисунке 8 представлены графики зависимости расхода РЖ от давления и потребляемой мощности насосов двухступенчатой гидроэжекторной ВСС. Расчёт проведен для режима работы с подпиткой (ряд 2 рисунка 6). Линия 4 соответствует минимальному соотношению давление/расход РЖ, при котором возможно создание требуемого вакуума. При увеличении расхода и давления РЖ увеличивается производительность ВСС, а график смещается вверх по диагонали (1, 2, 3). Оптимальное давление и расход рабочей жидкости подбираются исходя требуемого диапазона производительности ВСС и характеристик насосных агрегатов (рисунок 7).

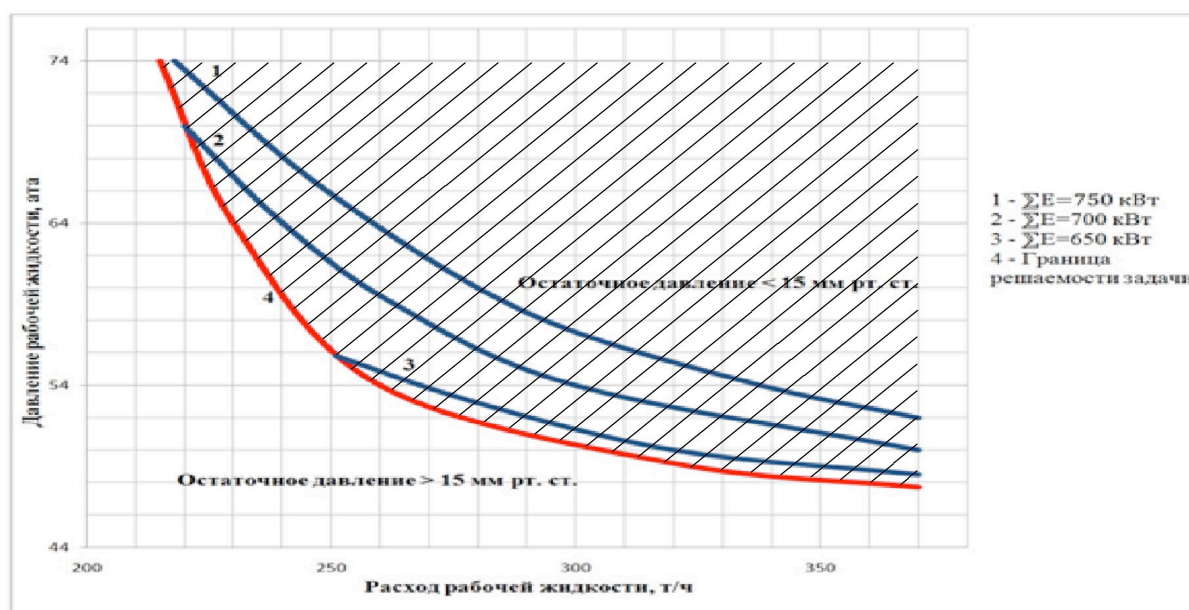
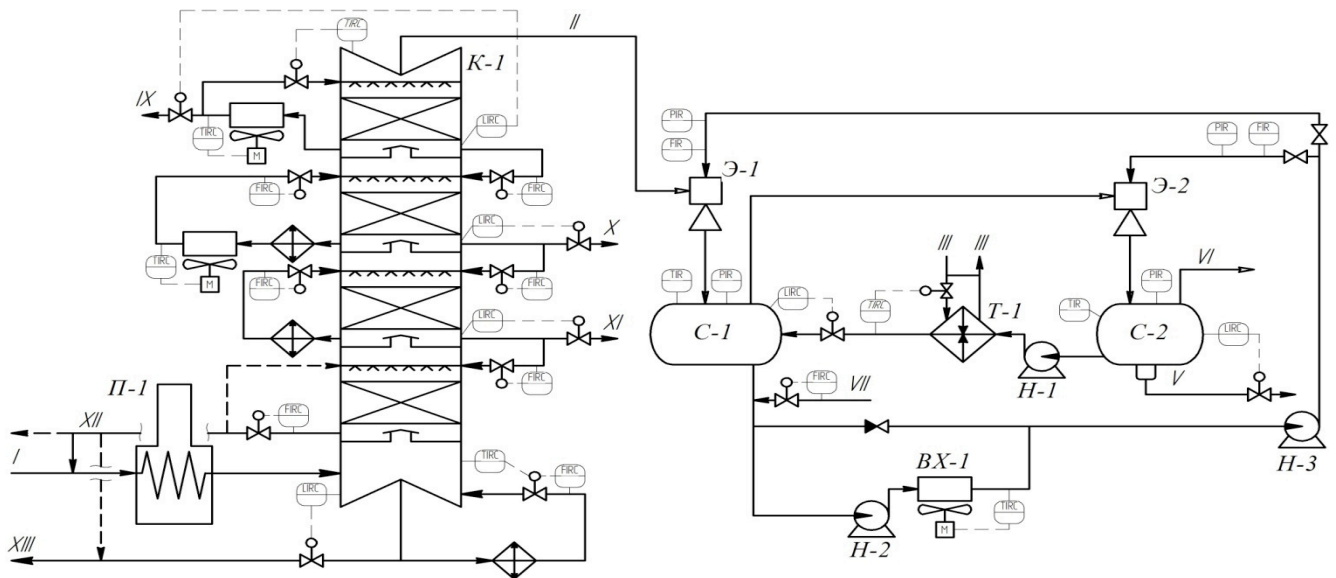


Рисунок 7 - Зависимость расхода рабочей жидкости от давления

В четвертой главе приведена двухступенчатая ВСС, разработанная в рамках договора, заключенного между ГУП ИНХП РБ и ООО «Афипский НПЗ» на разработку исходных данных для проектирования установки и ВСС «Комбинированная установка вакуумной перегонки мазута и висбрекинга гудрона ПМ-3». Для создания стабильного остаточного давления 15 мм рт. ст. в

вакуумной колонне предложена двухступенчатая гидроэжекторная вакуумсоздающая система с двумя параллельно работающими эжекторами на первой ступени. Такая конфигурация ВСС обеспечивает безостановочную работу вакуумного блока даже при отключении одного из трех эжекторов на ремонт. Технологическая схема предлагаемого блока вакуумной перегонки мазута с двухступенчатой гидроэжекторной ВСС представлена на рисунке 8. Следует отметить, что количество газов, откачиваемых из вакуумной колонны, непостоянно в связи с изменчивостью состава перерабатываемого мазута. В связи с этим предусмотрен запас производительности ВСС для обеспечения расчётных параметров на входе в ВСС 15 - 25 мм рт. ст.



I – мазут, *II* - ПГС из вакуумной колонны; *III* - теплоноситель; *IV* - воздух на охлаждение; *V* - отработанная РЖ; *VI* - ПГС на утилизацию; *VII* – свежая РЖ; *IX*÷*XIII* – дистилляты и гудрон; П-1 – печь; К-1 – вакуумная колонна; Э-1 - эжектор первой ступени; Э-2 - эжектор второй ступени; С-1 - сепаратор первой ступени; С-2 - сепаратор второй ступени; Т-1 - теплообменный аппарат; ВХ-1 - аппарат воздушного охлаждения; Н-3 - высоконапорный насос; Н-1,2 - промежуточные насосы

Рисунок 8 - Технологическая схема вакуумного блока с двухступенчатой гидроэжекторной ВСС

Выполнен сравнительный анализ вакуумных блоков существующих установок АВТ и установки ПМ-3 с двухступенчатой гидроэжекторной ВСС. Номинальная производительность установки - 2800 тыс. т/год по прямогонному мазуту. Диапазон устойчивой работы принят 60 - 110 % от номинальной производительности по мазуту. Основные технические решения, примененные при разработке исходных данных установки ПМ-3, обеспечивают получение суммарного вакуумного газойля качества, соответствующего ТУ 38.1011304-2004, и возможность получения суммарного вакуумного газойля с глубиной отбора до 580 °С, а также осуществление вакуумной перегонки без применения водяного пара. Сравнительная разгонка (ИТК) вакуумного газойля существующих установок, работающих в режиме сухой перегонки, а также с подачей водяного пара и ПМ-3 представлена на рисунке 9.

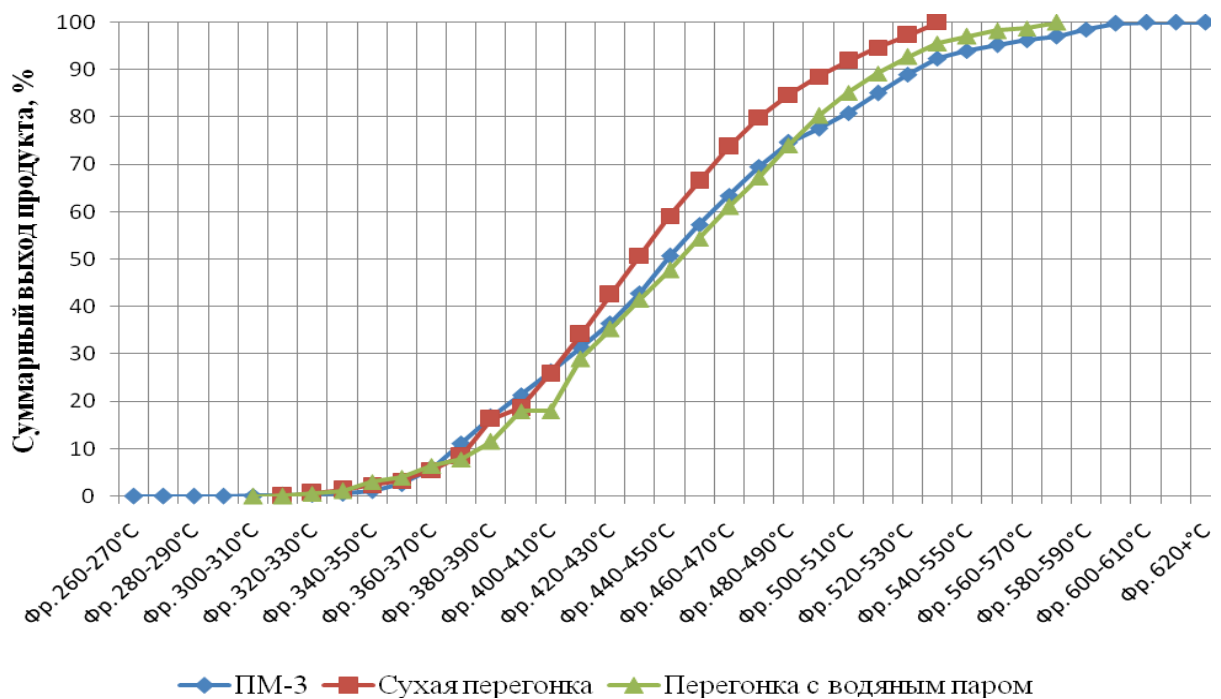


Рисунок 9 – Сравнительная разгонка вакуумных газойлей

В таблице 2 представлены сравнительные характеристики вакуумных газойлей и гудронов существующих установок АВТ и установки ПМ-3.

Таблица 2 - Сравнительные характеристики вакуумных газойлей и гудронов

Наименование параметра	Значение параметра		
	НПЗ-5	НПЗ-6	ПМ-3
Тип перегонки	с в.п.	сухая	сухая
Свойства вакуумного газойля (суммарного)			
Плотность	922	909	943,4
Вязкость кинематическая при 50 °С, мм ² /с	51,1	48,4	55,7
Свойства гудрона			
Вязкость условная гудрона, °С	390,0	64,5	394,2
Плотность при 15 °С, кг/м ³	1020	912	1031
Коксуюемость, % масс.	20,1	14,4	22,3

Сравнительные характеристики установки ПМ-3 с двухступенчатой гидроэжекторной ВСС и существующих вакуумных блоков с одноступенчатыми гидроэжекторными ВСС представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Сравнительные показатели вакуумных блоков

Наименование параметра	Значение параметра		
	НПЗ-5	НПЗ-6	ПМ-3
Тип перегонки	с в.п.	сухая	сухая
Производительность по мазуту, млн. т/год	4,5	3	3
Остаточное давление, мм рт. ст.	32	30	15
Расход рабочей жидкости, т/ч	480	370	240
Расход подпитки, т/ч	65	30	20
Отбор дистиллятов на мазут, т/т	0,583	0,476	0,727
Расход оборотной воды, м ³ /ч	2600	450	-*
Суммарные энергозатраты, кВт	1810	1300	800
Стоимость энергоресурсов: - электричество, руб./кВт·ч - оборотная вода, руб./ м ³	2 - 3 5 (до 15)		
Отбор дистиллятов, т/ч	350,1	183,7	244,4
Затраты на энергоресурсы, - электричество, тыс. руб./ ч - оборотная вода, руб./ч	5430,0 13000,0	3900,0 2250,0	2400,0 -*
Итого	18430,0	6150,0	2400,0
Удельные энергозатраты на дистилляты, кВт./т	5,7	7,1	3,3
Удельные затраты на дистилляты, руб./т	52,6	33,5	9,8

* - охлаждение РЖ осуществляется аппаратами воздушного охлаждения

Из данных таблицы 3 следует, что вакуумный блок мощностью 3 млн т/год по мазуту с двухступенчатой гидроэжекторной ВСС требует на 40 % меньше электроэнергии, чем одноступенчатая гидроэжекторная ВСС вакуумного блока, а удельные затраты ВСС на дистилляты снижаются на 70 %. По сравнению с вакуумным блоком, работающим с подачей водяного пара, удельные энергозатраты на дистилляты ниже на 56 %, а удельные затраты на дистилляты меньше в 5 раз.

Таким образом, технология вакуумной перегонки мазута без подачи водяного пара с двухступенчатой гидроэжекторной системой является наиболее выгодным и эффективным способом вакуумной перегонки мазута.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 На экспериментальном стенде доказана возможность создания гидроэжектором остаточного давления менее 10 мм рт. ст.

2 Обосновано, что в гидроэжекторных вакуумсоздающих системах эмульгированная вода является основным фактором, препятствующим достижению более глубокого вакуума.

3 Разработана двухступенчатая гидроэжекторная система создания вакуума, обеспечивающая содержание воды в циркулирующей рабочей жидкости не более 0,02 % масс.

4 Установлено, что минимальный расход рабочей жидкости в двухступенчатой гидроэжекторной системе достигается при доле обновления рабочей жидкости 8 - 16 % масс. и температуре 40 - 55 °С.

5 Технология вакуумной перегонки мазута без подачи водяного пара с двухступенчатой гидроэжекторной системой, реализованная в виде исходных данных для проектирования установки ПМ-3 Афипского НПЗ, снижает удельные энергозатраты более чем на 40 %, а удельные затраты на дистилляты снижаются до 5 раз по сравнению с известными технологиями вакуумной перегонки мазута.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных трудах:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1 Везиров И.Р., Везиров Р.Р., Гареев Р.Г., Емец С.А., Арсланов Ф.А., Теляшев Г.Г. Глубоковакуумная перегонка мазута // Научно-технический журнал «Мир нефтепродуктов». - 2011. - №3. – С.10 - 11.

2 Везиров И.Р., Везиров Р.Р., Арсланов Ф.А., Теляшев Г.Г. Технология глубоковакуумной перегонки мазута и двухступенчатая гидроэжекторная вакуумсоздающая система // Научно-технический журнал «Мир нефтепродуктов». – 2015. – № 10. – С. 33 - 34.

3 Везиров И.Р. Технология повышения эффективности гидроциркуляционных вакуумсоздающих систем // Научно-технический журнал «Мир нефтепродуктов». – 2015. – № 12. – С. 17 - 18.

4 Везиров И.Р., Везиров Р.Р. Комбинированная установка вакуумной перегонки мазута и коксования гудрона // Научно-технический журнал «Мир нефтепродуктов». – 2016. – №5 – С. 9 – 11.

5 Везиров И.Р., Везиров Р.Р., Арсланов Ф.А. Технология абсорбционной осушки газов и вакуумной регенерации абсорбента. // Башкирский химический журнал. – 2015. – Т. 22, № 4. – С. 33 - 38.

В патентах

6 Евразийский патент №017594 МПК С10G 7/06, В01D 3/10. Способ создания вакуума в аппаратах перегонки нефтепродуктов и вакуумсоздающая система / Р.Р. Везиров, Г.Г. Теляшев, И.Р. Везиров, Ф.А. Арсланов // - №2012005/84. Заявл. 16.04.2012; опубл. 16.11.2012.

7 Патент №120099 МПК С10G 7/06, В01D 3/10. Вакуумсоздающая система в аппаратах для перегонки нефтепродуктов / Р.Р. Везиров, Г.Г. Теляшев, И.Р. Везиров, Ф.А. Арсланов // - №201211605804. Заявл. 23.04.2012; опубл. 10.09.2012.

8 Патент №2546116 (РФ) МПК С10G 7/06, В01D 3/10. Способ создания вакуума для аппаратов перегонки нефтепродуктов и система создания вакуума. / Р.Р. Везиров, И.Р. Везиров // - №2013108569/04. Заявл. 26.02.2013; опубл. 10.09.2014.

9 Патент № 134529 (РФ) МПК С10G 7/06, В01D 3/10. Вакуумсоздающая система для аппаратов перегонки нефтяного сырья и нефтепродуктов. / Р.Р. Везиров, И.Р. Везиров // - №2013113501/04. Заявл. 26.03.2013; опубл. 20.11.2013.

10 Патент № 144558 (РФ) МПК С10G 7/06, В01D 3/10. Струйная установка для нагнетания газовых и жидкостных сред. / Р.Р. Везиров, И.Р. Везиров // - № 2014116190/06. Заявл. 22.04.2014; опубл. 27.08.2014.

11 Патент № 137666 (РФ) МПК C10G 7/06, B01D 3/10. Вакуумсоздающая система для промышленных аппаратов вакуумной перегонки нефтепродуктов. / Р.Р. Везиров, И.Р. Везиров // - №2013127471/04. Заявл. 17.06.2013; опубл. 27.02.2014.

12 Патент № 172733 (РФ) МПК B01D 19/02, B01D 17/00. Газожидкостной сепаратор. / Р.Р. Везиров, И.Р. Везиров // - №2016151109. Заявл. 23.12.2016; опубл. 21.07.2017.

В материалах международных научно-практических конференций

13 Везиров И.Р. Анализ работы одноступенчатых гидроэжекторных вакуумсоздающих систем. // Нефтегазопереработка – 2013: Международная научно-практическая конференция (г. Уфа, 22 мая 2013 г.): Материалы конференции. Уфа: Издательство ГУП ИНХП РБ, 2013. – С. 250 – 251.

14 Везиров И.Р. Технология регенерации рабочей жидкости гидроэжекторных вакуумсоздающих систем. // Нефтегазопереработка - 2016: Международная научно-практическая конференция (г. Уфа, 22 мая 2016 г.): Материалы конференции. Уфа: Издательство ГУП ИНХП РБ, 2016. – С. 184 – 185.

15 Везиров И.Р. Применение гидроэжекторных вакуумсоздающих систем для снижения выбросов вредных веществ на нефтеперерабатывающих предприятиях. // Нефтегазопереработка - 2016: Международная научно-практическая конференция (г. Уфа, 22 мая 2016 г.): Материалы конференции. Уфа: Издательство ГУП ИНХП РБ, 2016. – С. 183 – 184.