

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии

(Код и наименование направления подготовки/специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Оптимизация процесса каталитического дегидрирования изобутана на
примере ООО «Тольяттикаучук»

Обучающийся

С.Ю. Шершенко

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, В.С. Гончаров

(ученая степень(при наличии), ученое звание, Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Тема выпускной квалификационной работы: Оптимизация процесса каталитического дегидрирования изобутана на примере ООО «Тольяттикаучук».

Выпускную квалификационную работу выполнил: Шершненко Сергей Юрьевич.

Научный руководитель: Гончаров Виталий Степанович, к.т.н.

Объектом исследования в представленной работе является процесс дегидрирования изобутана в изобутан-изобутиленовую фракцию (ИИФ).

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что экологические аспекты имеют первостепенное значение для современных промышленных предприятий. Работа сосредоточена на снижении негативного воздействия человека на природу путем предотвращения загрязнения воздуха и водоемов выбросами пыли от катализаторов. Кроме того, особое внимание уделяется уменьшению потребления энергетических ресурсов и снижению расходов на их закупку и производство.

В первой части работы проведен патентный анализ методов очистки газа от пыли. Рассмотрен процесс получения изобутилена в процессе дегидрирования изобутана в присутствии алюмохромового катализатора. Выявлены проблемы существующие на предприятии связанные с утилизацией отработанного сырья и превышением предельно допустимых концентраций вредных веществ в атмосферный воздух.

В расчетно-технологической части представлен расчет материального баланса дегидрирования изобутана на производстве ООО «Тольяттикаучук» и предложена схема оптимизации очистки газовых потоков.

Третья часть работы посвящена расчету ущерба, наносимого окружающей среде при использовании мокрой очистки газов от катализаторной пыли.

Выпускная квалификационная работа состоит из 70 страниц, содержит 11 рисунков и 6 таблиц, а так же содержит 48 литературных источников.

Содержание

Введение.....	5
1 Технологическая схема процесса получения изобутан- изобутиленовой фракции	7
1.1 Дегидрирование изобутана на примере установки – БК-2 ООО «Тольяттикаучук»	7
1.2 Характеристика используемого сырья для получения ИИФ	13
1.3 Катализатор в процессе дегидрирования	15
1.4 Анализ существующей системы улавливания катализаторной пыли.....	16
1.5 Анализ методов очистки отходящих газов от взвешенных частиц	19
1.5.1 Аппараты мокрой очистки.....	20
1.5.2 Инерционные пылеуловители	22
1.5.3 Фильтры	24
1.5.4 Электроосадители	26
1.6 Патентный поиск в области газовой очистки от мелкодисперсных систем	27
1.6.1 RU 2 531 313 C1 Способ очистки газов от пыли	27
1.6.2 RU 2 373 988 C1 Устройство и способ мокрой очистки газов	28
1.6.3 RU 2 636 488 C2 Способ очистки газов от пыли и электрофильтр для его осуществления.....	29
2 Расчетно-технологическая часть	32
2.1 Расчет материального баланса производства	32
2.2 Оптимизация системы очистки отходящих газов	42
2.2.1 Подбор технологического оборудования	42
2.3 Технологический расчет основного оборудования.....	46
2.3.1 Расчет циклона	46
2.3.2 Расчет скруббера.....	50
2.3.3 Расчет электрофильтра.....	53

3 Эколого-экономическое обоснование.....	56
3.1. Анализ опасности образующихся отходов	56
3.2 Ущерб почвенным ресурсам от захоронения шлама на полигоне	57
3.3 Расчет платы за размещение отходов	59
3.4 Экономический расчет затрат на новое оборудование	60
Заключение	63
Список используемых источников.....	65

Введение

По данным Научно-исследовательского института технико-экономических исследований химической промышленности в России за 2023 год показал рост выпуска химической продукции на уровне допандемийного периода с 2020 до 2021 года. Наибольшая концентрация химических производств сосредоточена в Приволжском Федеральном округе. К одному из таких производств относится ООО «Тольяттикаучук», который производит бутилкаучук и синтетические изопреновые каучуки [4].

Переработка алканов является одним из главных нефтехимических направлений. «Основным способом получения бутилкаучука является каталитическое дегидрирование изобутана. По данным ЕМИСС на сегодняшний день производство бутилкаучука демонстрирует растущий спрос на каучуки в автомобильной отрасли» [14]. Основным сырьем для его получения является изобутилен, который извлекается из изобутана через процесс дегидрирования. В 2024 году модернизированные химические технологические процессы позволяют получать продукты с наивысшей частотой, пригодной для дальнейшего процесса полимеризации алкенов [1].

Установки БК-2 и БК-3 ООО «Тольяттикаучук» предназначены для производства изобутан-изобутиленовой фракции. Данный процесс протекает при помощи каталитического дегидрирования изобутана. В процессе образуется контактный газ, который в дальнейшем подвергают сепарированию при помощи различных методов химической технологии.

В процессе дегидрирования изобутана используют катализаторы. Самыми распространёнными в использовании являются алюмохромовые катализаторы. В Российской Федерации данный вид катализатора получил широкое распространение в связи с низкой стоимостью по сравнению с другими [3].

На сегодняшний день мощности установок БК-2 и БК-3 на 2024 год по производству составляют:

- по изобутилен-изобутановой фракции – 165 000 тонн в год;
- по изобутилену – 60 000 тонн в год.

С увеличением мощностей увеличивается и расход катализатора, в свою очередь увеличиваются отходы шестивалентного хрома, способные загрязнять почвенные и водные объекты.

Рассмотрим основные проблемы в области использования алюмохромового катализатора:

- выбросы отходящих газов в атмосферу, включающие в себя выброс катализаторной пыли;
- не регенерируемые отходы, загрязняющие водные объекты и почву;
- невысокая степень конверсии сырья;
- увеличение объёма потребления энергетических ресурсов;
- повышенное коксообразование [9].

Для успешного решения этих проблем необходим комплексный подход, который включает модернизацию системы и внедрение новых технологий.

Учитывая вышеизложенное, цель данной выпускной квалификационной работы заключается в повышении экономических показателей процесса дегидрирования изобутана и снижении атмосферных выбросов на производстве ИИФ ООО «Тольяттикаучук».

Задачи работы:

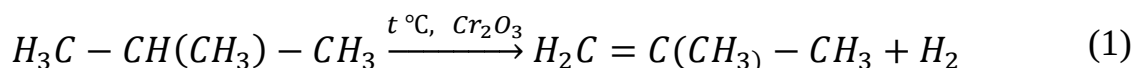
- провести анализ существующей технологии дегидрирования изобутана;
- провести литературный анализ наилучших доступных технологий и патентные исследования в области очистки газовых потоков от взвешенных частиц;
- предложить оптимальную технологию очистки отходящих газов;
- провести расчет материального баланса производства и основного оборудования;
- дать эколого-экономическую оценку предлагаемой технологии.

1 Технологическая схема процесса получения изобутан-изобутиленовой фракции

1.1 Дегидрирование изобутана на примере установки – БК-2 ООО «Тольяттикаучук»

Изобутилен получается через процесс каталитического дегидрирования изобутана, в результате чего образуется фракция изобутан-изобутилен (ИИФ), которая также известна как сырец. Эта фракция применяется на предприятии для производства изопрена, синтетических изопреновых каучуков и бутилкаучука [2].

Процесс осуществляется по реакции 1:

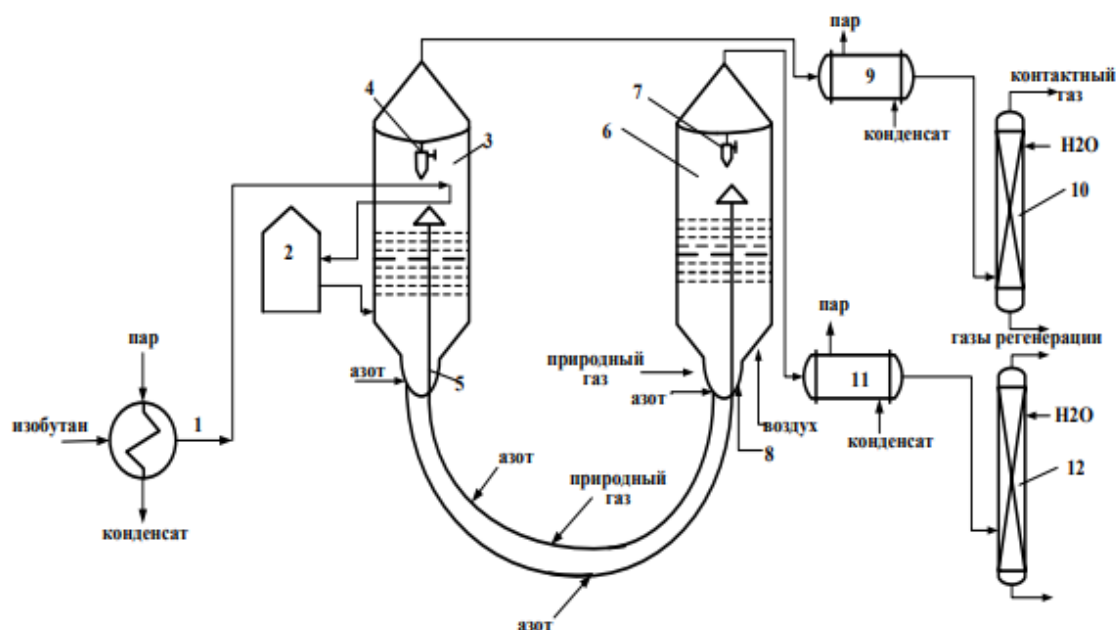


Данная реакция является эндотермическим процессом, который протекает в среднем при температуре 570 °С в присутствии алюмохромового катализатора. Принципиальная схема процесса дегидрирования изобутана на ООО «Тольяттикаучук» представлена на рисунке 1.

«Сырец и возврат изобутановой фракции поступают на установку БК-2 по отдельным потокам, где их смешивают для получения шихты. После этого шихта направляется в сепаратор. Жидкий изобутан, отделенный в сепараторе, попадает в испарители, где он испаряется с помощью водяного пара, подаваемого в межтрубное пространство этих испарителей, а затем возвращается обратно в сепаратор. После отделения паров углеводородов они поступают в змеевики заделки реактора, где газ нагревается до температуры 200–300 °С. В этом процессе также происходит охлаждение контактного газа, выходящего из «кипящего» слоя реактора, что помогает предотвратить крекинг целевого продукта» [13].

Во время производственного процесса пары углеводородов из змеевиков заделки направляются в трубчатую печь, где изобутан нагревается до

температуры 450–570 °С с использованием дымовых газов, образующихся при сжигании абгаза (природного газа).



1 – испаритель; 2 – печь; 3 – реактор; 4, 7 – циклон; 5 – стакан-десорбер;
6 – регенератор; 8 – стакан-восстановитель; 9, 11 – котёл-утилизатор;
10, 12 – скруббер.

Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема дегидрирования изобутана в «кипящем слое» катализатора

«Перед попаданием в печь, абгаз проходит через сепаратор, где отделяются жидкости и подогревается до 120 °С за счет водяного пара, который подается в межтрубное пространство. После этого абгаз используется как топливо для вихревых горелок печи. Также имеется возможность подачи паров изобутана в печь помимо змеевиков закалики.

Сгорание абгаза приводит к образованию продуктов, которые омывают радиантные и конвекционные змеевики печи, нагревая движущийся изобутан. Нагревая изобутан дымовые газы проходят через боров печи и выбрасывается в атмосферу. В радиантную зону печи подается пар для продувки ее внутреннего пространства, что создает тягу перед розжигом. Для удаления кислорода перед запуском в линию изобутана подается инертный газ» [25].

Парообразный изобутан, вышедший из печи, поступает аппарат реактора путем прохождения через распределительное устройство.

«В реакторе они проходят через десять секционированных решеток и контактируют с катализатором, который опускается вниз, образуя так называемый «кипящий» слой. В ходе этого процесса происходит дегидрирование, при котором тепло поглощается от паров сырья из печи и катализатора, поступающего из регенератора.

Циркуляция катализатора между реактором и регенератором обеспечивается системой перетоков, основанной на разнице давления между верхней и нижней частями аппаратов, а также подачей газов для аэрации и транспортировки. Чтобы катализатор равномерно распределялся по сечению реактора, верхний срез перетока оснащен конусным отбойником» [39].

«Контактный газ, пройдя пылеочистку от катализаторной пыли в двухступенчатых циклонах, расположенных сверху реактора, попадает в трубное пространство котла-утилизатора. Здесь он охлаждается за счет испарения водяного конденсата, который подается в межтрубное пространство котла. Накопленная катализаторная пыль ссыпается через стояки циклонов на верхнюю решетку реактора.

В трубном пространстве котла-утилизатора, когда контактный газ проходит, оседает катализаторная пыль, что снижает теплопередачу и может привести к повышению температуры газа на выходе. Для предотвращения засоров в трубках котла-утилизатора предусмотрена линия, которая подает горячий катализатор мелкими порциями из переточных линий в головку котла.

После выхода из котла-утилизатора контактный газ направляется сначала на нижний каскад, а затем на верхний каскад скруббера, где он орошается водой для удаления катализаторной пыли и охлаждения до температуры не выше 55 °С. После этого газ поступает в установку для компримирования и выделения ИИФ БК-3. Для повышения эффективности очистки контактного газа от катализаторной пыли и его охлаждения предусмотрена возможность подключения второго, неиспользуемого скруббера» [24].

«Водяной конденсат из емкости подается насосом через паросборник в котел-утилизатор. В ходе охлаждения контактного газа происходит испарение конденсата с образованием вторичного пара, который используется в технологических процессах, что способствует рекуперации» [41].

«Как упоминалось ранее, скруббер разделен на два каскада с помощью глухой тарелки: нижний каскад содержит 4 тарелки, а верхний — 10. В нижнем каскаде осуществляется очистка от катализаторной пыли посредством циркуляции воды, которая засасывается насосом с нижней части скруббера и подается под глухую тарелку. В процессе циркуляции в воде накапливается катализаторный шлам, поэтому часть воды из нижнего каскада постоянно выводится для осаждения шлама в отстойник. Осевший шлам затем отправляется на полигон для захоронения.

Для дополнительного охлаждения контактного газа в скруббере предусмотрена возможность подачи шламовой воды насосом по нижнему каскаду через холодильник.

В верхнем каскаде скруббера контактный газ охлаждается за счет циркуляции воды, которая поступает с глухой тарелки и затем подается насосом через холодильники в верхнюю часть скруббера. Осветленная вода из отстойника самотеком попадает в емкость, откуда она направляется насосом в линию всасывания.

Чтобы предотвратить избыточное давление в реакторе, перед скруббером установлены проточный гидрозатвор и сепаратор. При давлении в реакторе, превышающем $0,65 \text{ кгс/см}^2$, газ сбрасывается через гидрозатвор на факел низкого давления» [31].

«Во время процесса дегидрирования изобутана, помимо основной реакции, происходят и побочные. Одной из них является глубокое распадение изобутилена до углерода. Углерод (кокс) оседает на поверхностях и в порах катализатора, что уменьшает его активность. Для восстановления работы катализатора он подвергается регенерации в специальном устройстве, куда он поступает из стакана реактора по переточной линии» [43]. В стакан реактора

вводится азот (ингаз) для удаления адсорбированных углеводородов с поверхности частиц катализатора. В стриппингующем стакане реактора рядом с транспортной трубой установлена защитная гильза, в которую также подается азот (ингаз) для предотвращения образования кокса на транспортной трубе.

«Транспортировка катализатора из реактора в регенератор осуществляется благодаря разнице давления, а также с использованием азота (ингаза) и воздуха, которые подаются в различные точки переточных линий. Катализатор, поступающий в верхнюю часть регенератора в псевдосжиженном состоянии, стекает по шести секционирующим решеткам против потока воздуха, который подается в нижнюю часть регенератора через распределительное устройство» [5].

«Процесс регенерации катализатора состоит из трёх этапов:

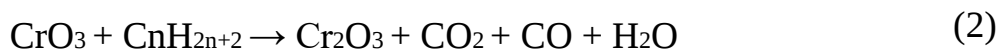
- выжигание кокса;
- окисление хромсодержащего катализатора;
- восстановление катализатора.

Выжигание кокса, окисление трехвалентного хрома, содержащегося в катализаторе, до шестивалентного, а также поддержание «кипящего» состояния катализатора и горения топлива происходит с помощью воздуха, подаваемого от воздуходувки Вн-15 под распределительную решетку регенератора.

Выделяемого при сгорании кокса тепла недостаточно для достижения необходимой температуры катализатора, поэтому в регенератор дополнительно подается природный газ. Для его сжигания предусмотрены три газовые форсунки и три комбинированные, расположенные в нижней части регенератора над распределительной решеткой.

Внизу регенератора установлен восстановительный стакан, который переходит в переточную линию. В этом стакане имеются два маточника, куда подается азот (ингаз) или природный газ» [47].

«Регенерированный и окисленный катализатор попадает в восстановительный стакан, где за счет подачи природного газа происходит восстановление катализатора: переход шестивалентного хрома в трехвалентный согласно формуле (2):



Десорбция продуктов восстановления из пор катализатора происходит с использованием азота (ингаза), который подается в нижнюю часть восстановительного стакана регенератора. Катализатор перемещается из регенератора в реактор через U-образный трубопровод, где воздух, природный газ и азот подаются в разные точки перетока.

Газы регенерации, образующиеся при сгорании кокса и топлива, очищаются в двухступенчатых циклонных установках в верхней части регенератора, что позволяет отделить катализаторную пыль. Чистая газовая фаза направляется в трубное пространство котла-утилизатора, где охлаждается за счет испарения конденсата, подаваемого насосом из специальной емкости. Пар из паросборника поступает в коллектор вторичного пара для дальнейшего использования в технологических процессах установки» [43-47].

«При движении газов регенерации через котел-утилизатор мелкодисперсная катализаторная пыль осаждается на стенках трубок, что может снижать теплопередачу и повышать температуру газа выше нормы. Для очистки трубок от пыли предусмотрена линия подачи небольших количеств горячего катализатора в поток газа регенерации.

После этого газы регенерации проходят через скруббер, где они охлаждаются и очищаются от катализаторной пыли, после чего выбрасываются в атмосферу» [26]. Чтобы избежать избыточного давления в регенераторе и трубном пространстве котла-утилизатора, установлен

проточный гидрозатвор с водяным столбом высотой 6,5 м. Сброс газов регенерации осуществляется через скруббер.

«Скруббер орошается охлаждающей водой по двум каскадам. Вода в нижнем каскаде циркулирует с помощью насоса, часть её отводится в аппарат для отстаивания от катализаторного шлама. В верхнем каскаде циркуляция осуществляется другим насосом. Очищенная вода с верхней части отстойников самотеком стекает в емкость и затем подается насосом в верхний каскад. Катализаторный шлам из отстойников регулярно вывозится на полигон» [16, 40].

«Конденсат поступает в емкость как из заводской сети, так и с установки. Потери катализатора компенсируются за счет бункеров: два бункера предназначены для хранения свежего катализатора, а третий - для отработанного. Новый катализатор поступает в цистернах и выгружается в бункеры пневмотранспортным методом. Из бункера он транспортируется в регенератор с использованием воздуха от воздуходвигателя, технического воздуха или азота» [44].

«Углеводороды, сбрасываемые предохранительными клапанами из аппаратов, попадают в отдельную емкость, с возможностью аварийного сброса в атмосферу. Жидкие углеводороды из емкостей подаются насосами в скруббер, тогда как газообразные углеводороды сбрасываются в факельный коллектор высокого давления.

Для предотвращения аварийных ситуаций при отклонении технологических параметров (давления, уровня, температуры) предусмотрены звуковая и световая сигнализации, а также автоматические блокировки» [8].

1.2 Характеристика используемого сырья для получения ИИФ

На установке БК-2 ООО «Тольяттикаучук» происходит испарение изобутана, его перегрев и дегидрирование непосредственно в «кипящем слое» катализатора ИМ-2201 или КДМ-М в изобутилен с получением контактного газа. Характеристические данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Реагенты химического процесса

Наименование реагента	Марка	Требования	Норматив
Изобутановый сырец	Марка А	Углеводородный состав, %	
		C_3H_8	1,3-1,5
		$C_4H_{10}^*$	97,0-98,0
		ΣC_4H_8	0,5
		C_4H_{10}	0,7-2,0
		Сернистые соединения	0,005
Изобутан	Марка А, Б	Углеводородный состав, %	
		C_3H_8	1,3-1,5
		$C_4H_{10}^*$	97,0-98,0
		ΣC_4H_8	0,5
		C_4H_{10}	0,7-2,0
		Сернистые соединения	0,005
Изобутановый возврат	дистиллят К-107 отделения И-3 установки И-3-9	Тяжелый осадок	0,2

* – изомеры

Требования и показатели качества к ИИФ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Требования и показатели качества к ИИФ

Наименование продукта	Сорт	Требования	Норматив
Изобутан-изобутиленовая фракция	Высший, первый	Компонентный состав, %	
		C_nH_{2n-2} (до C_3)	0,5-3,0
		$C_4H_8^*$	40,0-47,0
		C_4H_8	1,0-4,0
		C_4H_6	0,1-0,3
		Сернистые соединения	0,007

* – изомеры

1.3 Катализатор в процессе дегидрирования

Для процесса дегидрирования применяются алюмохромовые катализаторы. Эти катализаторы представляют собой химические вещества, которые ускоряют реакции, при этом не принимая непосредственного своего участия в процессе, не меняя свой химический состав. Данные типы катализаторов способствуют отделить молекулы водорода от соединения органического происхождения. Катализаторы обладают механической прочностью, избирательностью, термоустойчивы к высоким температурам и остаются неизменными при многократном использовании. В большинстве случаев катализаторы производят из доступного и недорогого сырья. Такой подход обеспечивает регенерацию катализаторов [11, 21, 33].

«Наиболее часто используемыми катализаторами в данном процессе являются микросферические алюмохромовые катализаторы ИМ-2201 и КДМ. Их качество имеет непосредственное влияние на свойства конечного продукта и работу всего оборудования» [35].

«Процесс производства алюмохромовых катализаторов включает несколько этапов:

- пропитка гранул оксида алюминия растворами хромовых соединений;
- осаждение гидроксидов хрома и алюминия с помощью аммиака из солевых растворов;
- смешение высокодисперсных кристаллических оксидов хрома и алюминия» [6];
- завершающим этапом является термообработка, которая позволяет улучшить свойства катализаторов, обеспечивая их высокую активность и термостабильность.

Срок службы алюмохромовых катализаторов определяется их термостойкостью и механической прочностью; по окончании этого срока происходит механическое разрушение катализатора. В таблице 3

представлены различные виды катализаторов и их сравнительные характеристики [36, 42, 48].

Таблица 3 – Характеристики алюмохромовых катализаторов [38]

Характеристика	КДМ	ИМ-2201
Агрегатное состояние	Порошкообразное соединение серо-зеленого цвета	
Насыпная плотность, г/см ³	1,0 - 1,4	1,0 - 1,4
Содержание хрома, %	1,0 - 2,0	4,0
Удельная поверхность, м ² /г	30 - 60	120 ± 30
Механическая прочность, %	≥ 72	≥ 92
Конверсия непредельных углеводородов, %	≥ 80	≥ 86

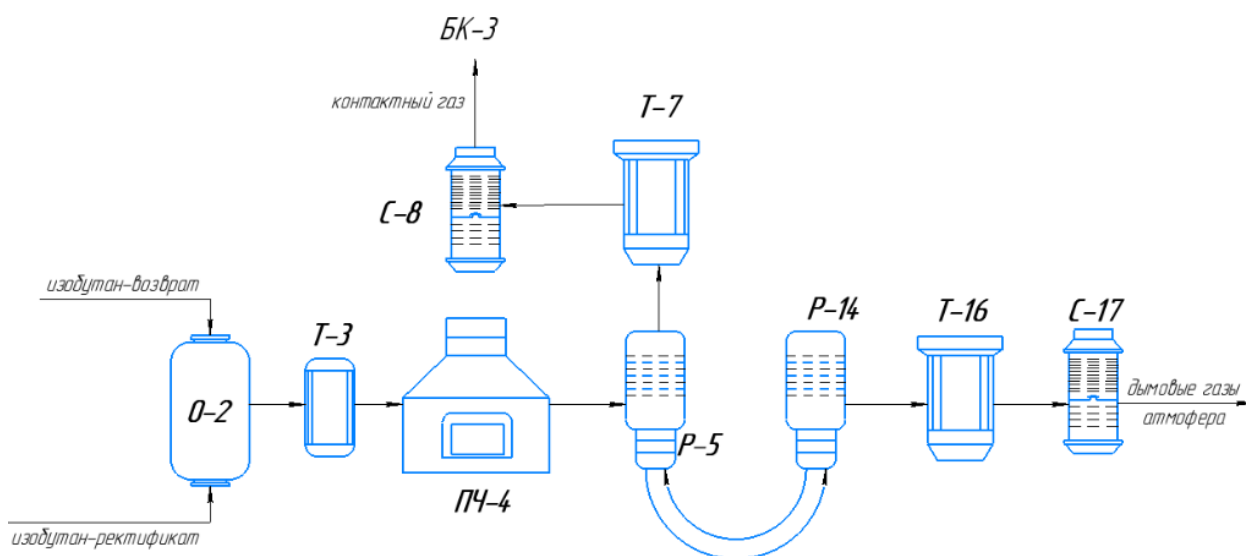
1.4 Анализ существующей системы улавливания катализаторной пыли

«Газы регенерации, образующиеся в результате сгорания кокса, топлива, в результате восстановления катализатора проходят две ступени циклонов, расположенных в верхней части регенератора, где отделяется катализаторная пыль. Уловленная в циклонах катализаторная пыль по мере накопления через стояки циклонов ссыпается на верхнюю решетку регенератора. Далее газы регенерации поступают в трубное пространство котла-утилизатора Т-16, где охлаждаются за счет испарения водяного конденсата, подаваемого в межтрубное пространство котла-утилизатора из емкости Е-23 насосом Н-22 через паросборник О-81. Пар из паросборника О-81 поступает через регулятор давления в коллектор вторичного пара для использования его на технологические нужды установок БК-2 и БК-3» [40].

«В котле-утилизаторе Т-16 пыль, входящая в состав газов регенерации, подвергается осаждению на внутренней части корпуса аппарата, что дает способствует понижению теплопередачи и увеличению температур газа» [37].

«При прохождении газов регенерации через котел-утилизатор Т-16 мелкодисперсная катализаторная пыль оседает на стенках трубок котла, что снижает теплопередачу и вызывает завышение температуры газа. Чтобы очистить полости котла подают горячий катализатор. Далее газы подвергаются очистке в скруббере С-17 после чего подаются на свечу в атмосферу» [21].

На рисунке 2 представлена схема очистки газов.



О-2 – сепаратор; Т-3 – испаритель; ПЧ-4 – печь; Р-5 и Р-14 регенераторы; Т-7 и Т-16 котлы-утилизаторы; С-8 и С-17 – скрубберы.

Рисунок 2 – Существующая система очистки дымовых и контактных газов на ООО «Тольяттикаучук»

«Имеется возможность дополнительного охлаждения дымового газа. На выходе из котла-утилизатора Т-16 дымовой газ разделяется на два потока: часть дымового газа поступает в скруббер С-17, а второй поток направляется в холодильник Т-16а/II, где охлаждается конденсатом водяного пара и направляется в скруббер С-17, а затем выбрасывается в атмосферу общим потоком через дымовую трубу» [23].

Конденсат на охлаждение дымового газа из емкости Е-23 насосом Н-55 подается в межтрубное пространство холодильника Т-16а/II, где нагревается и направляется в межтрубное пространство испарителя Т-3/2, в котором за

счет испарения жидкого изобутана охлаждается и направляется в емкость Е-23.

«Скруббер С-17 орошается по двум каскадам охлаждающей водой. Циркуляция воды в скруббере С-17 по нижнему каскаду осуществляется одним из насосов Н-29, часть воды при этом отводится в аппарат Е-49, Е-32/І для отстоя от катализаторного шлама. По верхнему каскаду циркуляция осуществляется одним из насосов Н-29» [42].

«Осветленная вода с верха отстойников Е-49, Е-32/1 сливается в емкость Е-47, откуда насосом Н-48 подается на всас насоса Н-29 по верхнему каскаду.

Катализаторный шлам с низа отстойников Е-49, Е-32/1 периодически вывозится на полигон захоронения.

Восполнение потерь катализатора в системе производится из бункеров Е-19/1,2,3. Два бункера Е-19/1 и Е-19/2 в основном служат для приема и хранения свежего катализатора, а бункер Е-19/3 – для отработанного.

Свежий катализатор поставляется в железнодорожных цистернах и выгружается в бункеры Е-19/1,2 пневмотранспортным способом.

Из бункера Е-19/1,2,3 катализатор транспортируется в регенератор за счет подачи в линию транспорта воздуха от воздухонагнетателя Вн-15, технического воздуха из заводской магистрали или азота (ингаза).

Для разогрева реакторного блока до температуры 400-450 °С в регенератор Р-14 подаются дымовые газы, получаемые в топке Т-20 под давлением.

Подача природного газа в топку Т-20 заблокирована с подачей воздуха от воздухонагнетателя Вн-15 и с давлением природного газа. При давлении природного газа ниже 0,5 кгс/см² или воздуха после воздуходувки до 0,7 кгс/см² прекращается подача природного газа в топку Т-20, закрывается клапан-отсекатель поз. НV 9007» [46].

После разогрева системы производится загрузка катализатора в регенератор и разогрев его до температуры 370-400 °С. При появлении уровня

катализатора в регенераторе Р-14 налаживается циркуляция катализатора между регенератором Р-14 и реактором Р-5.

«Нагрев катализатора в регенераторе до температуры 600-650 °С осуществляется за счет сжигания дизельного топлива, подаваемого в жидкостные форсунки регенератора из емкости Е-24 насосом Н-25.

При температуре катализатора 600-650 °С обогрев регенератора переводится на природный газ, подача дизельного топлива прекращается.

При отклонении технологических параметров в аппаратах (давления, уровня, температуры) от заданных значений и для предотвращения аварийных ситуаций предусмотрены звуковая, световая сигнализации и автоматические блокировки.

Для сбора стоков от сальников насосов установки БК-2 предусмотрена заглубленная емкость Е-59, освобождение которой производится давлением азота (ингаза) в емкость Е-33/1, откуда самотеком в емкость Е-47.

Для сбора ливневых стоков (снежных, дождевых) установлена заглубленная емкость Е-104, освобождение которой производится самовсасывающим автобойлером и вывозится на полигон захоронения.

Очистка стенок аппаратов от катализаторной пыли перед ремонтом производится с помощью установки вакуумной очистки, которая состоит из вакуум-насоса Н-107 и бункера с циклоном Е-105. Катализатор из застойных зон, тупиков отсасывается с помощью вакуума, создаваемого вакуум-насосом Н-107 в бункер Е-105, откуда вывозится на полигон захоронения» [36].

1.5 Анализ методов очистки отходящих газов от взвешенных частиц

На текущем этапе развития промышленности очистка технологического воздуха от различных вредных примесей, таких как твердые частицы, газы, аэрозоли и жидкости, становится важной частью безотходной технологии. Это необходимо для улучшения экологической ситуации и повышения качества производственных процессов.

Существует несколько методов удаления загрязняющих веществ из воздуха. Один из них – механическая фильтрация, где очищение происходит с помощью жестких или гибких перегородок и фильтрующих материалов. Другой подход – силовые методы, которые используют различные физические поля для того, чтобы осадить частицы пыли. К таким методам относятся гравитационные, электрические и магнитные поля.

Аппараты, используемые для очистки газов, классифицируются по способу осаждения частиц. К таким относятся сухая и мокрая очистки и электроосаждение. В сухих устройствах улавливание частиц пыли происходит под действием центробежным, гравитационным и инерционным силам. К сухим пылеуловителям также относятся фильтры. Мокрые пылеуловители работают за счет взаимодействия запыленного газа с жидкостями, позволяя частицам оседать на каплях или пузырьках жидкости. Электрофильтры используют электрический заряд для осаждения пыли, что делает их эффективными для очистки воздуха от мелкодисперсных загрязнителей.

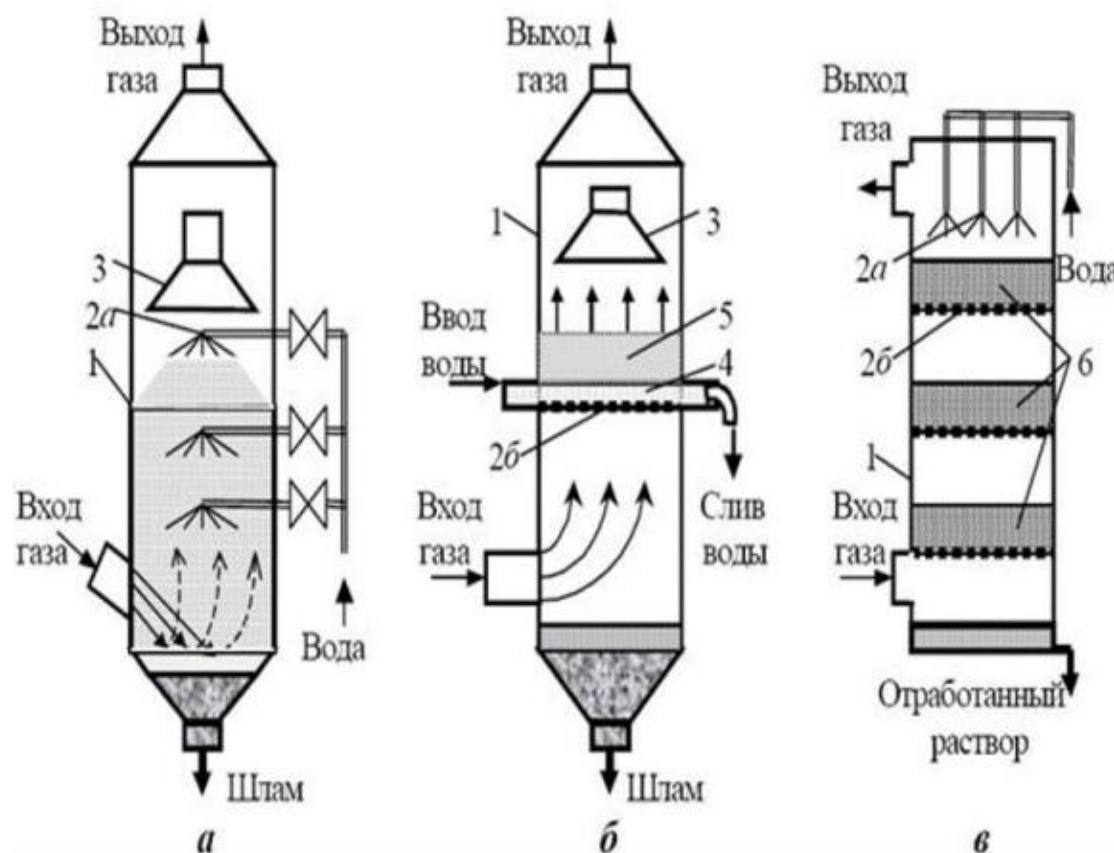
Таким образом, современные технологии очистки воздуха играют ключевую роль в снижении загрязнения и обеспечении безопасных условий труда на предприятиях.

1.5.1 Аппараты мокрой очистки

Процесс улавливания пыли в мокрых пылеуловителях происходит благодаря конденсации водяного пара на частицах пыли, что способствует их агрегации. Это явление связано с тем, что неровные твердые частицы при давлении ниже насыщенного пара и при определенной температуре испытывают капиллярную конденсацию.

«Эффективность улавливания пыли определяется потерей давления и не зависит от размеров, формы или типа скруббера (за исключением высокоскоростных газопромывателей). Если гидравлическое сопротивление составляет от 1250 до 2500 н/м², то улавливаются частицы размером более 10 мкм. При сопротивлении от 5000 до 10000 н/м² удается захватить частицы меньшего размера — менее 5 мкм» [29]. В процессе мокрой очистки дымовых

газов пыль легко выводится из газового потока. На рисунке 3 представлены различные виды мокрых уловителей.



1 – корпус; 2а – форсунки; 2б – решетка; 3 – брызгоуловитель; 4 – вода; 5 – пена; 6 – насадка.

Рисунок 3 – Типы мокрых уловителей (а – форсуночный скруббер; б – барботажно-пенный пылеуловитель; в – орошаемая противоточная насадочная башня).

Однако при очистке с использованием скруббера образуются жидкие шламы с кислым водородным показателем, что приводит к коррозии оборудования, включая газовые трубы, шламосборники и насосы. Также некоторые виды пыли могут создавать твердые отложения на конструкциях пылеуловителях, что в дальнейшем может вывести оборудование из строя.

Скруббер Вентури — это устройство, предназначенное для мокрого улавливания пыли, обеспечивающее эффективную очистку дымовых газов от

мелких частиц (менее 5 мкм) и диоксида серы. Пыльные газы поступают в трубу Вентури, где они смешиваются с тонкой струей жидкости, подающейся тангенциально. «В верхней части устройства происходит столкновение газа и жидкости, что приводит к образованию капель, которые захватывают пылевые частицы. Эта газожидкостная смесь затем проходит через затопленный «локоть» и попадает в каплеотбойник, где благодаря центробежным силам тяжелые смоченные частицы отделяются от газового потока и оседают в шламоотстойнике.

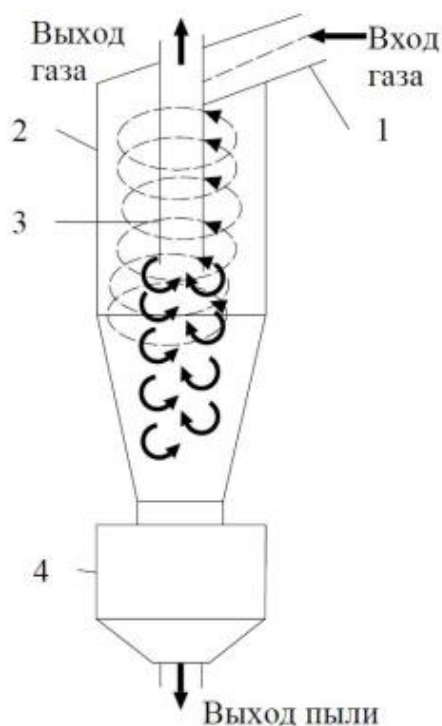
Преимущества данного аппарата включают:

- 99 % эффективность очистки;
- перепад давления от 2,5 до 15 кПа;
- возможность регулировки (ручной или автоматической);
- распределение жидкости по открытым трубам;
- минимальные требования к обслуживанию» [12].

«Основной проблемой при эксплуатации таких устройств является абразивный износ стенок скруббера, который возникает из-за высоких скоростей газа, достигающих 430 км/ч в горловине. Частицы и капли, движущиеся с такой скоростью, способствуют быстрому разрушению стенок. Для уменьшения этого износа можно покрыть внутренние стенки горловины карбидом кремния и сделать это покрытие заменяемым. Кроме того, износ может происходить в колене нижней части скруббера, и для его снижения рекомендуется заполнить дно колена слоем той же жидкости, которая подается в верхнюю часть скруббера, чтобы смягчить ударные нагрузки на стенки» [16].

1.5.2 Инерционные пылеуловители

В инерционных пылеуловителях удаление частиц из газового потока осуществляется за счет инерционных сил, которые возникают при изменении направления или скорости газа. В качестве примера на рисунке 4 представлен циклон.



1 – патрубок для входа пылегазовой смеси; 2 – корпус циклона;
3 – выходной патрубок; 4 – бункер для сбора пыли.

Рисунок 4 – Циклон для сухой очистки воздуха от пыли

«Установки циклонов широко используются в теплоэнергетике, при выработке тепла и энергии с помощью сжигания топлива. Прямоточные циклоны имеющие большой диаметр применяются для первой стадии улавливания высокоабразивной золы.

Батарейные циклоны могут работать как самостоятельные золоуловители на котлах малой и средней мощности, а также могут использоваться при сжигании топлива.

Батарейные циклоны бывают разных типов:

- по форме конуса (прямоугольные или цилиндрические);
- по конструкции газораспределительной камеры (прямоугольные или клиновидные);
- по количеству секций (односекционные и многосекционные);
- по назначению (для взрывоопасной или невзрывоопасной пыли)» [7].

Батарейные циклоны типа БЦ-2 обычно разделены на две работающие параллельно секции, и одну из них можно отключить при снижении объема очищаемого газа. В каждой секции предусмотрены предохранительные клапаны. Эти циклоны способны работать при запыленности газа до 75 г/м^3 для слабослипающейся пыли и до 35 г/м^3 для среднеслипающейся.

Циклон БЦ-2 имеет несколько преимуществ, включая высокую степень очистки (КПД не ниже 85%) и регулировку производительности. Он изготовлен из чугуна, что увеличивает его устойчивость к абразивному износу. Разборная конструкция обеспечивает легкость ремонта.

Но у батарейных циклонов есть весомые недостатки, на изготовление таких аппаратов необходимо большое количество металла по сравнению с изготовлением одиночного циклона. Но из-за трудной схемы движения газа эффективность очистки может быть снижена.

Жалюзийные золоуловители отличаются простотой конструкции и компактностью, но обладают низкой эффективностью очистки. Они в основном применяются для котлов малой мощности, работающих на торфе, и реже используются в качестве первой ступени очистки. К их преимуществам можно отнести надежность и простоту. Устройства сухой очистки газов позволяют извлекать золу и пыль в сухом виде, и могут использоваться как самостоятельно, так и в сочетании с другими газоочистными системами в зависимости от требований по очистке [18].

1.5.3 Фильтры

«Фильтрация взвешенных твердых или жидких частиц в газах происходит благодаря нескольким физическим процессам, таким как броуновская диффузия, захват частиц при контакте, а также действия инерционных, электростатических и гравитационных сил. Промышленные фильтры можно классифицировать по типу используемого фильтрующего материала на несколько групп» [28]:

- воздушные фильтры предназначены для очистки воздуха, используемого в системах вентиляции, кондиционирования,

отопления и охлаждения, а также в технологических процессах. Их конструкция может включать кассетные сеточные фильтры и кассетные фильтры из стеклянных или синтетических волокон. В самоочищающихся масляных фильтрах пыль оседает в виде шлама на дне масляной ванны;

- рукавные фильтры являются наиболее распространённым типом тканевых фильтров. Они состоят из корпуса с рукавами, сделанными из шерсти, хлопка или стекловолокна. Загрязненный воздух проходит через эти рукава, которые периодически очищаются от накопившейся пыли. Тканевые фильтры классифицируются в зависимости от размера рукавов, формы фильтрующих элементов, типа материалов и методов их регенерации, таких как встряхивание или обратная продувка;
- электрофильтры — это высокоэффективные устройства для очистки газа, которые имеют более низкие эксплуатационные расходы по сравнению с другими фильтрами. Они состоят из электрофильтра и источника питания. Газ поступает в электрофильтр, где на электроды подается высокое напряжение, создающее коронный разряд. Это приводит к образованию отрицательно заряженных ионов, которые двигаются к осадительным электродам. Осадительные электроды могут иметь различные формы, такие как трубчатые, коробчатые, прутковые и другие. Электрофильтры бывают мокрыми или сухими, в зависимости от метода удаления пыли, а также могут быть вертикальными или горизонтальными, однозонными или двухзонными;
- волокнистые фильтры представляют собой фильтры объемного действия, состоящие из нескольких слоев фильтрующего материала различной толщины.

- мокрые волокнистые фильтры, или туманоуловители, функционируют на основе принципа улавливания жидких частиц из тумана с помощью волокнистого слоя;

1.5.4 Электроосадители

«Электрофильтр — это устройство, изготовленное из металлического или железобетонного корпуса, внутри которого находятся осадительные и коронирующие электроды. На входе в электрофильтр установлено специальное устройство, обеспечивающее равномерное распределение газов по активной зоне фильтра. Кроме того, в конструкции предусмотрены механизмы для удаления накопившейся пыли.

Электрофильтры классифицируются по направлению движения газа на вертикальные и горизонтальные. Также они могут быть трубчатыми или пластинчатыми, что зависит от конструкции осадительных электродов. Кроме того, существуют два типа электрофильтров в зависимости от метода удаления задержанных частиц: сухие и мокрые. В сухих моделях частицы, осевшие на электродах, удаляются при помощи встряхивания и под действием силы тяжести попадают в бункер. Мокрые электрофильтры смывают осевшие частицы с помощью водяной пленки. Из-за того, что некоторые частицы пыли могут накапливать положительный заряд и оседать на коронирующих электродах, эти электроды оснащены механизмами для встряхивания или омываются водой» [33].

«Электрофильтры могут иметь различное количество последовательно расположенных систем электродов, например, однопольные или двухпольные, а также разное число параллельных секций, включая одно-, двух- и трехсекционные. Эффективность работы этих фильтров зависит от длины пути газа, его скорости и температуры. Снижение температуры газа приводит к уменьшению вязкости, увеличению прочности разрядного промежутка и повышению содержания сернистого ангидрида. Увеличение влажности газа также улучшает эффективность, поскольку влага создаёт проводящую пленку на частицах, что снижает удельное сопротивление слоя пыли» [12]. Скорость

газа влияет на время, в течение которого частицы находятся в фильтре: при высокой скорости возрастает вероятность повторного уноса частиц.

1.6 Патентный поиск в области газовой очистки от мелкодисперсных систем

Для оценки технического уровня темы выпускной квалификационной работы был проведён патентный поиск среди материалов патентного фонда. Исследуемая тема относится к международной классификации (МПК) и охватывает классы C01D 47/00 и C07C 10/06.

Сбор и анализ существующих технических решений нацелены на выявление наиболее эффективных и экономически целесообразных методов модернизации системы очистки отходящих газов от катализаторной пыли. При этом рассматриваемые решения сопоставляются с теми, которые разрабатываются в рамках дипломного проекта.

1.6.1 RU 2 531 313 C1 Способ очистки газов от пыли

Данное устройство относится к очистке газов в металлургической промышленности с использованием циклона. Ввод газового потока происходит в верхней части аппарата, а выход происходит вертикально по оси. В аппарат подразумевается подача коагулирующей жидкости. После улавливания взвешенных частиц жидкость подается на вальцевой пресс в результате чего образуется брикет в сборном бункере [15].

Основным недостатком существующего технического решения является низкая эффективность очистки газов от пыли, связанная с высокой температурой очищаемого газа. Эта высокая температура увеличивает вязкость газа и усложняет действие центробежных сил во время его движения, что в свою очередь снижает качество пылеулавливания. Кроме того, в процессе очистки в пылесборнике и надбункерном пространстве образуется низкая температура, которая не позволяет эффективно сушить брикеты и укреплять их структуру. В результате недостаточно прочные брикеты могут

разрушаться при низкой температуре, что приводит к образованию вторичной пыли и снижению эффективности пылеулавливания.

Для устранения этих проблем необходимо оптимизировать температурный режим в процессе пылеулавливания при движении газов в цилиндрическом корпусе циклона. Важно создать благоприятные условия для брикетирования пыли в пылесборнике и надбункерном пространстве. Для этого нужно охлаждать очищаемые газы и перенаправлять часть тепловой энергии из рабочего пространства циклона в надбункерное пространство, где будет осуществляться сушка брикетов [16, 19].

1.6.2 RU 2 373 988 C1 Устройство и способ мокрой очистки газов

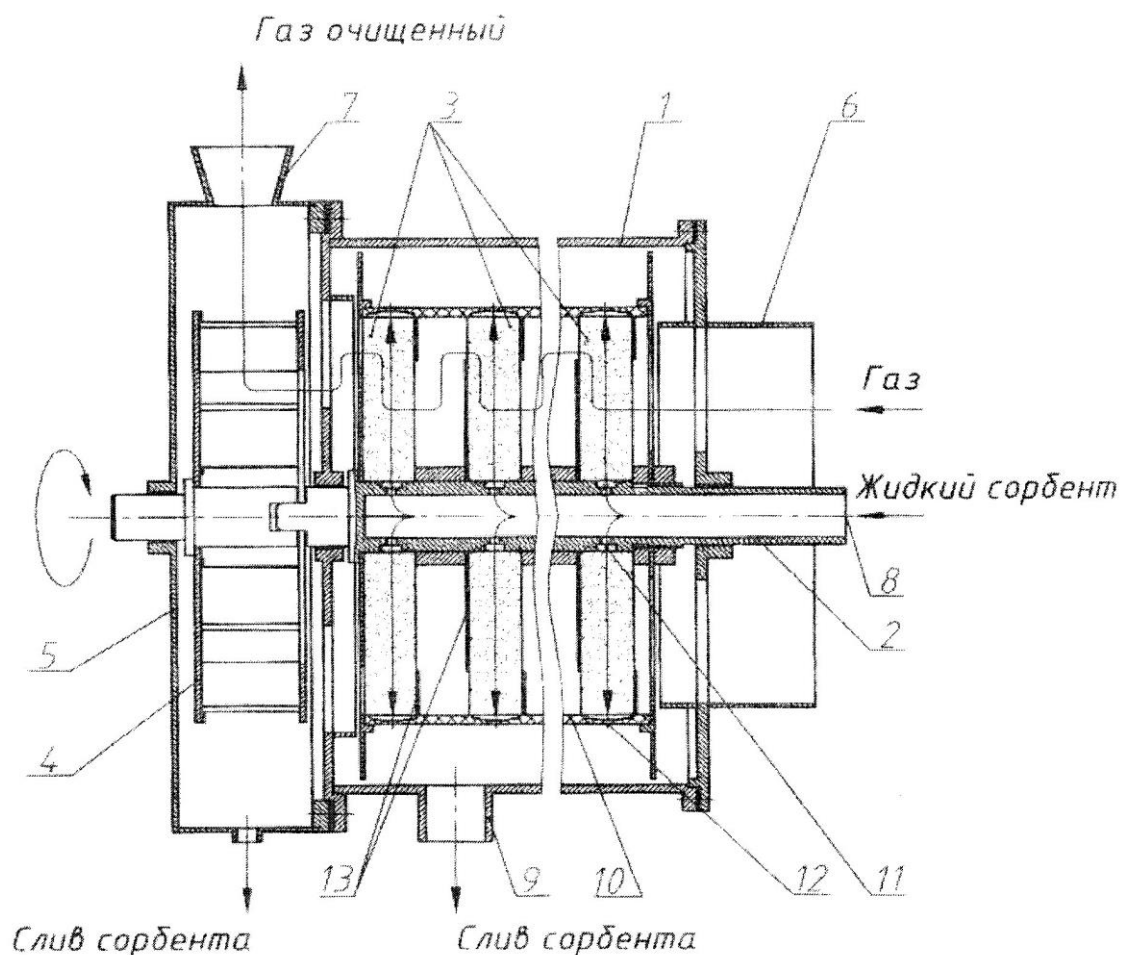
«Изобретение предназначено для влажной очистки газов от вредных загрязняющих веществ и может использоваться в различных отраслях промышленности, таких как сельское хозяйство, химическая и энергетическая сферы, а также в других областях производственной деятельности.

Загрязнённый газовый поток направляется в цилиндрический корпус, где он контактирует с жидкостью для грубодисперсной очистки. Для достижения более тонкой очистки необходимо использовать сепараторы.

На рисунке 5 представлено устройство для влажной очистки газов, состоящее из цилиндрического корпуса с дисковым ротором внутри. На полом вала ротора установлены проницаемые пористые диски, которые расположены параллельно друг другу. На выходе вала имеется вентилятор, размещённый в улиткообразном кожухе и оснащённый каплеуловителем. В корпусе устройства предусмотрены входные и выходные патрубки для газа, а также отверстия для подачи и слива жидкости.

Основной особенностью данного устройства является наличие герметичной оболочки, которая отделяет внутреннюю часть ротора с газожидкостной смесью от корпуса и вентилятора. В стенках полого вала и герметизирующей оболочки, в местах соприкосновения с пористыми дисками, находятся кольцевые протоочки с отверстиями. Эти протоочки в герметизирующей оболочке созданы для формирования гидрозатвора» [20].

Торцевые поверхности дисков частично закрыты экранирующими пластинами: они установлены на входной стороне диска ближе к его периферии, а на выходной стороне — ближе к центру диска.



- 1 – цилиндрический корпус; 2 – полый вал; 3 – пористые диски; 4 – вентилятор;
 5 – кожух-улитка; 6 – входной патрубок; 7 – выходной патрубок; 8 – входное отверстие;
 9 – сливное отверстие; 10 – герметизирующая оболочка; 11, 12 – кольцевые проточки;
 13 – экранирующие пластины.

Рисунок 5 – Устройство скруббера

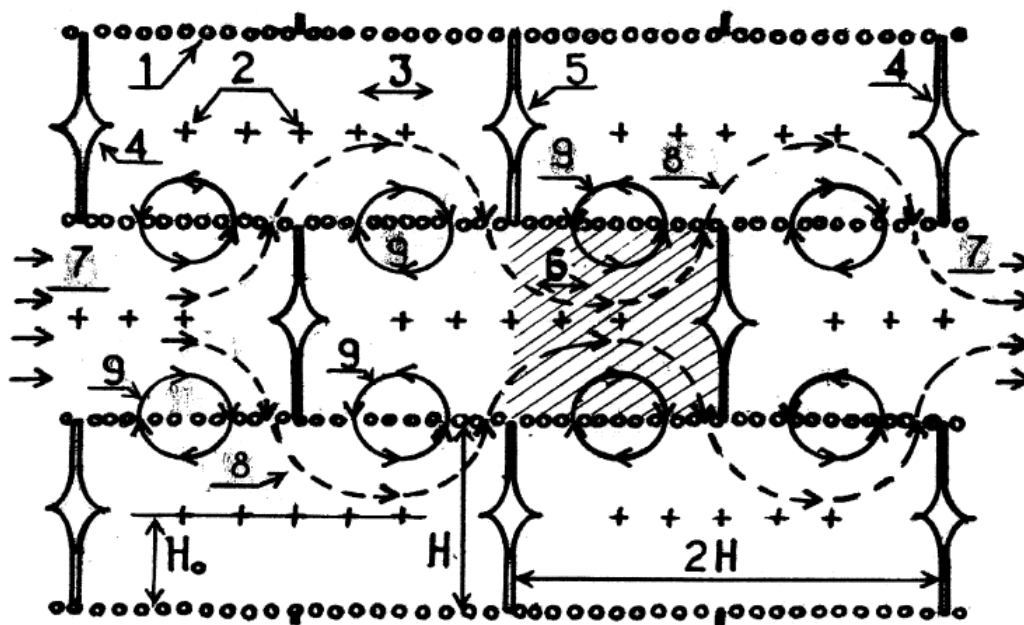
Недостатком данного метода являются значительные размеры и сложная конструкция устройства, которое его реализует.

1.6.3 RU 2 636 488 C2 Способ очистки газов от пыли и электрофильтр для его осуществления

Изобретение касается методов очистки газов от пыли и неэлектропроводных жидкостей с использованием электрического поля в

электрофильтрах. Этот способ может быть применен в таких областях, как металлургия, химия, энергетика и других промышленных секторах.

На рисунке 6 представлен схема движения потока в электрофильтре.



- 1 – осадительные электроды; 2 – коронирующие электроды; 3 – каналы;
 4 – заслонки; 5 – диафрагма; 6 – зона корпуса электрофильтра;
 7 – пылегазовый поток; 8 – синусоидальная форма движения;
 9 – циклическая круговая форма движения.

Рисунок 6 – Способ очистки газов от пыли и электрофильтр

Способ очистки газов в электрофильтре включает в себя синусоидальное движение пылегазового потока в электростатическом поле активной зоны устройства. Он отличается тем, что направление движения пылегазового потока изменяется с синусоидального на круговое. После этого поток проходит через зону коронного разряда, где частицы пыли получают наибольший электрический заряд. Затем он попадает в область квазиоднородного электростатического поля, где происходит интенсивное осаждение частиц пыли. Далее пылегазовый поток циклически и последовательно меняет направление своего кругового движения,

возвращаясь к синусоидальному, и поэтапно проходит по всей длине канала электрофильтра.

Эффективность пылеулавливания двухпольного электрофильтра электрофильтра по предлагаемому способу пылеулавливания равна 99,8%.

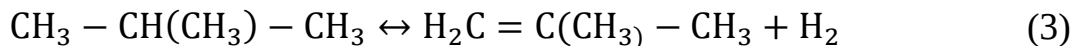
Предлагаемый способ пылеулавливания соответствует принципам энергоэффективности и энергосбережению, в том числе ресурсосбережению [22].

Выводы по разделу:

В данном разделе обсуждаются основные методы очистки загрязнённых газов от взвешенных частиц. В ходе патентного поиска было установлено, что наиболее эффективным способом очистки является применение электрофильтра, который способен достигать эффективности очистки до 99,9%. Новаторской особенностью предлагаемой технологии является то, что на предприятии ООО «Тольяттикаучук» на установке БК-2 и БК-3 используются в качестве системы очистки загрязнённых газов циклон и скруббер. Данная система не отвечает современным экологическим стандартам промышленных выбросов.

2 Расчетно-технологическая часть

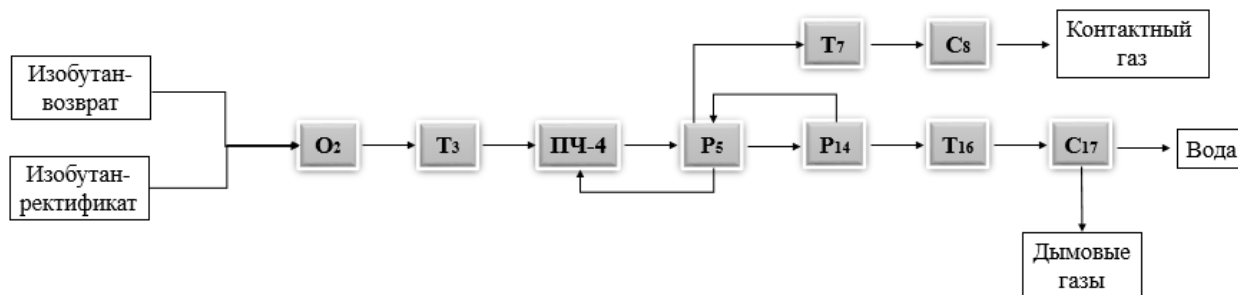
На производстве ООО «Тольяттикаучук» изобутилен получают согласно реакции 3:



ИИФ является промежуточным продуктом при получении изобутилена. Его выделение происходит на установках БК-2 и БК-3. При расчете материального баланса дегидрирования учитывается приход продукта, т.е. процесс расчета начинается с конечной стадии.

2.1 Расчет материального баланса производства

Для расчета материального баланса процесса дегидрирования изобутана начертим блок-схему материальных потоков, представленную на рисунке 7/



O₂ – сепаратор; T₃ – испаритель; ПЧ-4 – печь; P₅ – реактор;
P₁₄ – регенератор; T₇, T₁₆ – котел-утилизатор; C₈, C₁₇ – скруббер.

Рисунок 7 – Блок-схема материальных потоков

Согласно протоколу процесса количества сырья, поступившие в сепаратор [45]:

Расход изобутан-возврата и изобутан-ректификата $m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 31,45 \text{ м}^3/\text{ч}$;

Степень конверсии $\omega = 83 \%$;

Количество рабочих дней $\tau = 350 \text{ дней} = 8400 \text{ ч}$;

Ежемесячный расход катализатора $m_{\text{кат}} = 147$ т.

1) Найдем массу изобутана согласно плотности $\rho = 18,940$ кг/м³ при температуре $t = 49,52$ °С и давлении $18,965$ кгс/см² по формуле 4:

$$m = V \cdot \rho \quad (4)$$

где V – расход изобутан-возврата и изобутан-ректификата;

ρ – плотность изобутана.

$$m = 31,45 \cdot 18,940 = 595,66 \text{ кг/ч}$$

2) Найдем массу прореагировавшего изобутана по формуле 5:

$$G_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{m \cdot 83}{100} \quad (5)$$

где ω – степень конверсии.

$$G_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{595,66 \cdot 83}{100} = 494,40 \text{ кг/ч}$$

3) Рассчитаем массу не прореагировавшего изобутана по формуле 6:

$$G'_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = m - G_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \quad (6)$$

$$G'_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 595,66 - 494,40 = 101,26 \text{ кг/ч}$$

Согласно технологическому регламенту [24] производства известен состав контактного газа, в состав которого входит непрореагировавших изобутан. В таблице 1 представлены процентные содержания компонентов.

Таблица 1 – Состав контактного газа

Компонент	% масс	Компонент	% масс
Водород	1,7	Азот	2,4
Метан	2,8	С ₃	0,4
Оксид углерода	0,8	С ₅	3,5
Диоксид углерода	0,6	н Бутан	0,5
Изобутан	46,9	н Бутилен	0,5
Изобутилен	39,8	Бутадиен	0,1

4) Рассчитаем массовое содержание газа по формуле 7:

$$m_i = \frac{G'_{C_4H_{10}} \cdot \omega_i}{\omega_{G'_{C_4H_{10}}}} \quad (7)$$

где ω_i – массовое содержание компонентов;

$\omega_{G'_{C_4H_{10}}}$ – массовое содержание изобутана.

$$m_{H_2} = \frac{101,26 \cdot 1,7}{46,9} = 3,67 \text{ кг/ч}$$

$$m_{CH_4} = \frac{101,26 \cdot 2,8}{46,9} = 6,04 \text{ кг/ч}$$

$$m_{CO} = \frac{101,26 \cdot 0,8}{46,9} = 1,73 \text{ кг/ч}$$

$$m_{CO_2} = \frac{101,26 \cdot 0,6}{46,9} = 1,29 \text{ кг/ч}$$

$$m_{C_4H_8} = \frac{101,26 \cdot 39,8}{46,9} = 85,93 \text{ кг/ч}$$

$$m_{N_2} = \frac{101,26 \cdot 2,4}{46,9} = 5,18 \text{ кг/ч}$$

$$m_{C_3} = \frac{101,26 \cdot 0,4}{46,9} = 0,86 \text{ кг/ч}$$

$$m_{C_5} = \frac{101,26 \cdot 3,5}{46,9} = 7,56 \text{ кг/ч}$$

$$m_{HC_4H_{10}} = \frac{101,26 \cdot 0,5}{46,9} = 1,08 \text{ кг/ч}$$

$$m_{HC_4H_8} = \frac{101,26 \cdot 0,5}{46,9} = 1,08 \text{ кг/ч}$$

$$m_{C_4H_6} = \frac{101,26 \cdot 0,1}{46,9} = 0,22 \text{ кг/ч}$$

Согласно технологическому регламенту производства известен состав фракций изобутана (ректификат и возврат), представленный в таблице 2.

Таблица 2 – Состав изобутановой шихты

Компонент	Изобутан-возврат	Изобутан-ректификат
	% масс	% масс
C ₃	0,5	0,3
C ₅	0,1	-
Изобутан	83,1	98,1
Изобутилен	14,7	0,5
н Бутан	1,0	0,6
н Бутилен	0,5	0,5
Бутадиен	0,1	-

Соотношение возврата к ректификату 2:1.

5) Составим пропорцию.

$$x + 0,5x = 494,40$$

$$1,5x = 494,40$$

$$x = 397,11$$

$$m_{\text{возврат}} = 329,6 \text{ кг/ч}$$

$$m_{\text{ректификат}} = 164,8 - \text{кг/ч}$$

6) Рассчитаем массовое содержание компонентов в возврате по формуле 8 [32]:

$$m'_{\omega i} = \frac{m_{\text{возврат}} \cdot \omega_{i\text{возврат}}}{100} \quad (8)$$

$$m'_{C_3} = \frac{329,6 \cdot 0,5}{100} = 1,65 \text{ кг/ч}$$

$$m'_{C_5} = \frac{329,6 \cdot 0,1}{100} = 0,33 \text{ кг/ч}$$

$$m'_{C_4H_{10}} = \frac{329,6 \cdot 83,1}{100} = 273,89 \text{ кг/ч}$$

$$m'_{C_4H_8} = \frac{329,6 \cdot 14,7}{100} = 48,45 \text{ кг/ч}$$

$$m'_{\text{HC}_4\text{H}_{10}} = \frac{329,6 \cdot 1}{100} = 3,3 \text{ кг/ч}$$

$$m'_{\text{HC}_4\text{H}_8} = \frac{329,6 \cdot 0,5}{100} = 1,65 \text{ кг/ч}$$

$$m'_{\text{C}_4\text{P}_6} = \frac{329,6 \cdot 0,1}{100} = 0,33 \text{ кг/ч}$$

7) Рассчитаем массовое содержание компонентов в ректификате по формуле 9:

$$m''_{\omega i} = \frac{m_{\text{ректификат}} \cdot \omega_{\text{ректификат}}}{100} \quad (9)$$

$$m''_{\text{C}_3} = \frac{164,8 \cdot 0,3}{100} = 0,5 \text{ кг/ч}$$

$$m''_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{164,8 \cdot 98,1}{100} = 161,67 \text{ кг/ч}$$

$$m''_{\text{C}_4\text{H}_8} = \frac{164,8 \cdot 0,5}{100} = 0,82 \text{ кг/ч}$$

$$m''_{\text{HC}_4\text{H}_{10}} = \frac{164,8 \cdot 0,6}{100} = 0,99 \text{ кг/ч}$$

$$m''_{\text{HC}_4\text{H}_8} = \frac{164,8 \cdot 0,5}{100} = 0,82 \text{ кг/ч}$$

8) Рассчитаем количество используемого катализатора по формуле 10:

$$m'_{\text{kat}} = \frac{m_{\text{kat}}}{700} \quad (10)$$

где m_{kat} – ежемесячный расход катализатора;

700 – количество рабочих часов в месяц.

$$m'_{\text{kat}} = \frac{147}{700} = 0,21 \frac{\text{т}}{\text{ч}} = 210 \text{ кг/ч}$$

Объем дымовых газов примем по технологическому регламенту раздела охраны окружающей среды $V = 4,93 \text{ м}^3/\text{ч}$. Фактическая концентрация компонентов зарегистрирована путем автоматизированной системы мониторинга производственного процесса.

Таблица 3 – Состав дымовых газов

Компонент	% объема	Фактическая концентрация, г/с	Массовая концентрация, г/м ³	ПДВ, г/с
Азот	73,5	-		-
Кислород	4,6	-		-
Оксид углерода	0,2	0,27147	198,153	0,03993
Диоксид углерода	12,9	-		-
Метан	< 0,1	-		-
Пыль	8,7	0,11832	86,365	0,10314

10) Найдем массу 1 кубического метра дымового газа по формуле 11:

$$m = V \cdot \rho \quad (11)$$

где V – объем дымовых газов;

ρ – плотность дымовых газов (примем, что $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$).

$$m_{\text{дг}} = 4,93 \cdot 1,3 = 6,41 \text{ кг/ч.}$$

11) Рассчитаем количество дымовых газов согласно количественному составу, представленному в таблице 3, по формуле 12:

$$m_i = \frac{m \cdot w_i}{100} \quad (12)$$

где w_i – объемное содержание компонентов в дымовых газах.

$$m_{\text{N}_2} = \frac{6,41 \cdot 73,5}{100} = 4,71 \text{ кг/ч}$$

$$m_{\text{O}_2} = \frac{6,41 \cdot 4,6}{100} = 0,29 \text{ кг/ч}$$

$$m_{\text{CO}} = \frac{6,41 \cdot 0,2}{100} = 0,01 \text{ кг/ч}$$

$$m_{CO_2} = \frac{6,41 \cdot 12,9}{100} = 0,83 \text{ кг/ч}$$

$$m_{CH_4} = \frac{6,41 \cdot 0,1}{100} = 0,01 \text{ кг/ч}$$

$$m_{пыль} = \frac{6,41 \cdot 8,7}{100} = 0,56 \text{ кг/ч}$$

12) Найдем количество отработанного катализаторного шлама по формуле 13 при условии, что на 1 тонну катализатора образуется 200,1 кг отхода:

$$m_{шлама} = \frac{m_{отр} \cdot m_{kat}}{1000} \quad (13)$$

где $m_{отр}$ – масса отработанного катализатора при
1000 – 1 тонна используемого катализатора.

$$m_{шлама} = \frac{200,1 \cdot 210}{1000} = 42 \text{ кг/ч}$$

13) Рассчитаем количество образовавшегося водяного пара по формуле 14:

$$n_{H_2O} = \frac{m_{дг} \cdot p_1}{M_{дг} \cdot (P - p_1)} \quad (14)$$

где p_1 – давление насыщенного водяного пара (примем $p_1 = 23,8$ кПа);

P – давление при рабочих условиях;

$M_{дг}$ – молярная масса дымовых газов.

Молярная масса дымовых газов находится по формуле 15 [30]:

$$M_{дг} = M_{N_2} \cdot \omega_{N_2} + M_{O_2} \cdot \omega_{O_2} + M_{CO_2} \cdot \omega_{CO_2} + M_{CO} \cdot \omega_{CO} + M_{CH_4} \cdot \omega_{CH_4} \quad (15)$$

где M_{N_2} и ω_{N_2} – молярная масса и объемная доля азота в дымовом газе;

M_{O_2} и ω_{O_2} – молярная масса и объемная доля кислорода в дымовом газе;

M_{CO_2} и ω_{CO_2} – молярная масса и объемная доля диоксида углерода в дымовом газе;

M_{CO} и ω_{CO} – молярная масса и объемная доля оксида углерода в дымовом газе;

M_{CH_4} и ω_{CH_4} – молярная масса и объемная доля метана в дымовом газе.

$$M_{дг} = 28 \cdot 0,735 + 32 \cdot 0,046 + 44 \cdot 0,129 + 28 \cdot 0,002 + 16 \cdot 0,001 \\ = 27,8 \text{ кг/кмоль}$$

$$n_{H_2O} = \frac{6,41 \cdot 23,8}{27,8 \cdot (24,1 - 23,8)} = 22,86 \text{ кмоль/ч}$$

Найдем массу водяного пара по формуле 16:

$$m_{H_2O} = n_{H_2O} \cdot M_{H_2O} \quad (16)$$

$$m_{H_2O} = 22,86 \cdot 18 = 411,48 \text{ кг/ч}$$

Сведем полученные значения в таблицу 4.

Таблица 4 – Материальный баланс процесса дегидрирования изобутана

Приход				Расход			
Компонент		кг/ч	%	Компонент		кг/ч	%
Изобутан- возврат, в том числе	C3	1,65	0,5	Контактный газ, в том числе	Водород	3,67	1,7
	C5	0,33	0,1		Метан	6,04	2,8
	Изобутан	273,89	83,1		Оксид углерода	1,73	0,8
	Изобутилен	48,45	14,7		Диоксид углерода	1,29	0,6
	н Бутан	3,3	1,0		Изобутан	101,26	46,9
	н Бутилен	1,65	0,5		Изобутилен	85,93	39,8
	Бутадиен	0,33	0,1		Азот	5,18	2,4
	Итого	329,6	100 (46,79)		C3	0,86	0,4
Изобутан- ректификат, в том числе	C3	0,5	0,3		C5	7,56	3,5
	Изобутан	161,67	98,1		н Бутан	1,08	0,5
	Изобутилен	0,82	0,5		н Бутилен	1,08	0,5
	н Бутан	0,99	0,6		Бутадиен	0,22	0,1
	н Бутилен	0,82	0,5		Итого	215,9	100 (30,65)
	Итого	164,8	100 (23,40)	Дымовые газы	Азот	4,71	73,5
Катализатор	КДИ-М (ИМ-2201)	210	29,81		Кислород	0,29	4,6
					Оксид углерода	0,01	0,2
					Диоксид углерода	0,83	12,9
					Метан	0,01	< 0,1

Продолжение таблицы 4

					Пыль	0,56	8,7
					Итого	6,41	100 (0,91)
				Отработанный катализатор	Катализаторный шлам	42	5,96
				Потери (4 %)		28,61	4,06
				Водяной пар		411,48	58,42
ИТОГО		704,4	100	ИТОГО		704,4	100

2.2 Оптимизация системы очистки отходящих газов

Предлагаемая технологическая схема очистки отходящих газов представлена на рисунке 8. В новой схеме, как и в существующей, контактный газ от процесса регенерации проходят через батарейный циклон и котел-утилизатор Т-16. После охлаждения в котле-утилизаторе до температуры 300 °С, газ поступает на вторую ступень очистки – электрофильтр ЭФ-1.

Электрофильтр типа УГ представляет собой газоочистное устройство с металлическим корпусом, внутри которого располагается механическое оборудование, включая осадительные и коронирующие электроды, механизм для встряхивания электродов, изоляторные узлы и газораспределительные решётки. Когда запылённый газ проходит через электрофильтр, частицы пыли получают заряд и под воздействием электрического поля осаждаются на осадительных электродах. Удаление накопившейся пыли с электродов осуществляется с помощью механизмов встряхивания. Газы, очищенные от катализаторной пыли, поступают в теплообменник для использования тепла газов в заводской сети. В итоге охлажденные дымовые газы выбрасываются в атмосферу через трубу.

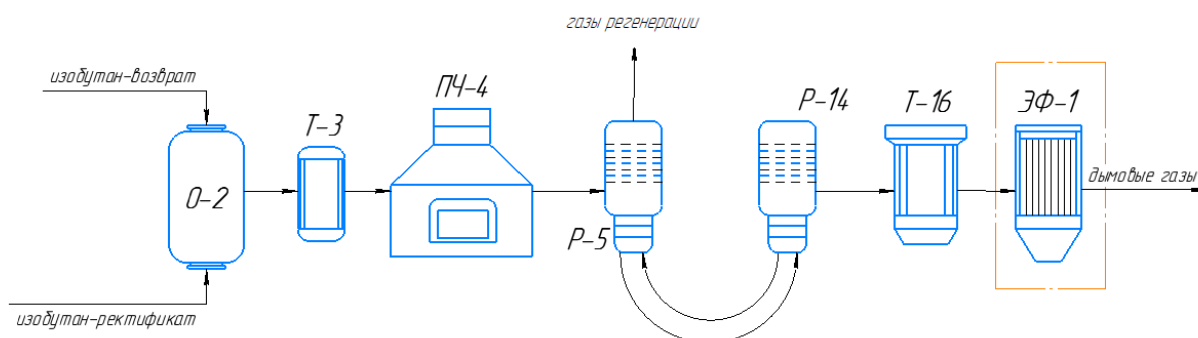
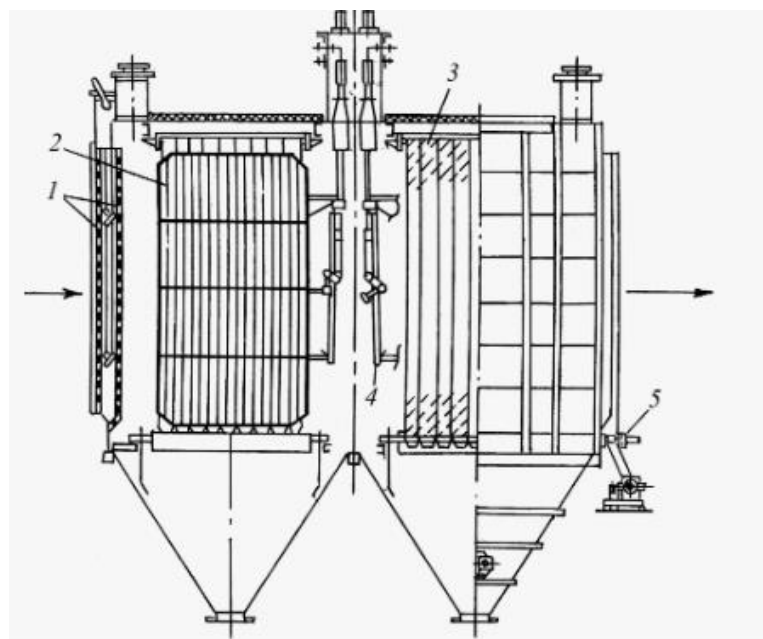


Рисунок 8 – Принципиальная схема предлагаемой технологии

2.2.1 Подбор технологического оборудования

Электрофильтры подразделяются на разные типы согласно направлению движения воздуха. Различаются два типа: горизонтальный и вертикальный. Горизонтальный электрофильтр представлен на рисунке 9.



- 1 – газораспределительная решетка; 2 – коронирующие электроды;
 3 – осадительные электроды; 4 – механизм встряхивания коронирующих электродов;
 5 – механизм встряхивания осадительных электродов.

Рисунок 9 – Горизонтальный пластинчатый электрофильтр

«В зависимости от формы электродов типы подразделяются на трубчатые и пластинчатые.

Основные преимущества электрофильтров:

- высокая степень очистки мелкодисперсных примесей;
- низкое гидравлическое сопротивление аппарата;
- возможность очистки горячих газов с температурой до 600 °С.

Пластинчатые электрофильтры используются для очистки газа от твердых и жидких частиц под воздействием электрического тока. Они состоят из камеры, где на равном расстоянии установлены металлические вертикальные листы – пластины, а между ними находятся провода» [34].

К преимуществам пластинчатый электрофильтров относятся:

- компактность;
- простота монтажа;
- удобство отряхивания электродов;

- возможность увеличения производительности камеры без увеличения ее размеров;
- удобство удаления осажденной пыли [17].

Пластинчатые электрофильтры обладают несколькими преимуществами: они компактны, легко монтируются, удобны для очистки электродов и позволяют увеличивать производительность камеры без необходимости её расширения. Кроме того, такой фильтр обеспечивает более простой процесс удаления осаждённой пыли. В зависимости от направления движения газа пластинчатые электрофильтры делятся на вертикальные и горизонтальные модели.

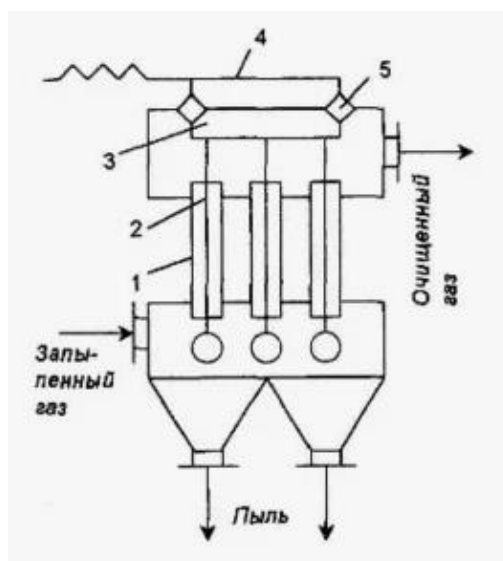
«Пластинчатые электрофильтры состоят из чередующихся рядов пластин и проволок. Фильтрация в этих устройствах основана на передаче зарядов ионов к частицам загрязнений, что приводит к их осаждению на осадительных и коронирующих электродах.

Электрофильтры делятся на сухие и мокрые в зависимости от влажности газа. В сухих электрофильтрах очистка происходит при температуре выше точки росы, что позволяет эффективно улавливать сухую пыль. Они широко используются в промышленности для удаления мелкодисперсных частиц из газовых потоков. Мокрые электрофильтры, наоборот, предназначены для удаления влажной пыли и способны захватывать капли жидкости, взвешенные в газе. Такие фильтры более эффективны для обработки газов с водяными парами или жидкостями, так как уменьшают вероятность загрязнения электродов.

В трубчатых электрофильтрах осадительными электродами служат металлические трубы, а коронирующими – натянутая проволока. При выборе конструкции электрофильтра критически важны характеристики обрабатываемого газа (его химический состав, температура, давление, влажность) и свойства дисперсной фазы (концентрация, дисперсность, электропроводность)» [48].

«Пластинчатые электрофилтры имеют несколько преимуществ перед трубчатыми: они менее металлоемки, компактнее, проще в установке и легче чистятся от осаждённой пыли. С другой стороны, трубчатые электрофилтры могут работать с более высоким напряжением электрического поля, что позволяет достичь большей удельной производительности» [19].

Трубчатые электрофилтры работают на принципе ударной ионизации газа в электрическом поле, создаваемом в зоне коронирующего разряда. На корпус устройства подаётся положительный заряд от источника тока, а на проволоку – отрицательный, что формирует напряжение между электродами в пределах 50-100 кВ. В этой системе проволока выполняет роль коронирующего электрода, тогда как корпус служит осадительным электродом. Трубчатый электрофилтр иллюстрирован на рисунке 10.



1 – осадительный электрод; 2 – коронирующий электрод; 3 – рама;
4 – встряхивающее устройство; 5 – изолятор.

Рисунок 10 – Электрофилтр с трубчатыми электродами

Сравнительный анализ марок и типов электрофилтров представлен в таблице 5.

Исходя из всех этих факторов, в качестве прототипа был выбран пластинчатый электрофилтр, который обеспечит наиболее качественную очистку дымовых газов от катализаторной пыли.

Таблица 5 – Сравнительный анализ электрофильтров

Показатель	Тип электрофильтра		
	УГ	ЭГА	УВ
Начальная запыленность, г/м ³	90	50	30
Температура на входе, °С	425	330	250
Количество полей	4	4	2
Гидравлическое сопротивление, Па	15	15	3,5
Эффективность очистки, %	99,9	99,7	99,9
Производительность по газу, тыс. м ³ /ч	36000	38160	25000
Площадь активного сечения, м ²	10	10,6	21
Межэлектродный промежуток, мм	300	275	1

Проведя анализ марок и типов электрофильтров был определен тип электрофильтра серии УГ, унифицированные горизонтальные высокотемпературные сухие, предназначенные для очистки от пыли газов с температурой до 425 °С, применяются в химической промышленности, в черной и цветной металлургии, в цементной промышленности.

2.3 Технологический расчет основного оборудования

Задачей технологических расчетов разных методов очистки газа является выявление наиболее эффективного аппарата для очистки газа от катализаторной пыли.

2.3.1 Расчет циклона

Расчёт эффективности циклона будем относительно циклона ЦН-15.

d_{50}^T примем 4,5 так как циклон марки ЦН-15.

Стандартное отклонение размеров частиц пыли $\lg \delta_{\text{ч}} = 0,468$.

Скорость газового потока для циклона $\omega_{\text{опт}} = 3,8$ м/с.

Диаметр частиц пыли $d_M = 12$ мкм.

Объем газов, поступающих на очистку $V_0 = 2,96$ м³/ч $\sim 25\,000$ м³/год.

1) Найдем площадь сечения циклона по формуле 17:

$$F = \frac{V}{\omega_{\text{опт}}} \quad (17)$$

где $\omega_{\text{опт}}$ – скорость газового потока для группы циклонов (примем $\omega_{\text{опт}} = 3,8$ м/с);

V – объем газа, поступающий в аппарат и рассчитывается по формуле 18:

$$V = \frac{V_0 \cdot (273 + t_0)}{3600 \cdot 273} \quad (18)$$

где V_0 – объем газов, поступающих на очистку;

t_0 – температура отходящих газов в регенератор.

$$V = \frac{25000 \cdot (273 + 650)}{3600 \cdot 273} = 23,48 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$F = \frac{23,48}{3,8} = 6,18 \text{ м}^2$$

2) Рассчитаем диаметр циклона по формуле 19:

$$D = 1,13\sqrt{F} \quad (19)$$

$$D = 1,13\sqrt{6,18} = 2,81 \text{ м}$$

3) Согласно данному диаметру рассчитаем действительную скорость циклона по формуле 20:

$$\omega = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad (20)$$

$$100 \cdot \left| \frac{\omega_p - \omega_{\text{оп}}}{\omega_{\text{оп}}} \right| \leq 15 \% \quad (21)$$

$$\omega = \frac{4 \cdot 23,48}{3,14 \cdot 2,8^2} = 3,82 \text{ м/с}$$

$$100 \cdot \left| \frac{3,82 - 3,8}{3,8} \right| = 0,5 \%$$

$$0,5 \% < 15\%$$

Условие выполняется.

4) Диаметр частиц, осаждаемых с эффективностью при рабочих условиях определили по формуле 22:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D_{Ц}}{D_T} \cdot \frac{\rho_{чТ}}{\rho_ч} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{\omega_T}{\omega_P}} \quad (22)$$

Значение соответствует следующим типовым параметрам работы циклона:

$$\omega_T = 3,8 \text{ м/с},$$

$$D_T = 0,6 \text{ м},$$

$$\rho = 1930 \text{ кг/м}^3,$$

$$\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

$$d_{50} = 4,5 \cdot \sqrt{\frac{2,8}{0,6} \cdot \frac{1300}{2900} \cdot \frac{24,1 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,8}{3,82}} = 6,67 \text{ мкм}$$

5) Рассчитали параметр X по формуле (23):

$$X = \frac{\lg(d_m/d_{50})}{\sqrt{\lg^2 \delta_{\eta}^T + \lg^2 \delta_{\chi}}} \quad (23)$$

где $\lg^2 \delta_{\eta}^T$ – стандартное отклонение функции распределения парциальных коэффициентов очистки;

$\lg^2 \delta_{\chi}$ – стандартное отклонение размеров частиц пыли.

$$X = \frac{\lg(12/6,67)}{\sqrt{0,3^2 + 0,468^2}} = 0,45$$

6) По величине параметра X определили значение нормальной функции распределения $\Phi(X)$ – полный коэффициент очистки газа, выраженный в долях по формуле (24):

$$\Phi(X) = \begin{cases} 0,3762 \cdot X + 0,5 & 0 \leq X \leq 0,6 \\ 1 - \frac{1}{5,6 \cdot X + 0,5} & X > 0,6 \end{cases} \quad (24)$$

$$\Phi(X) = 1 - \frac{1}{5,6 \cdot 0,45 + 0,5} = 0,67 > 0,6$$

7) Определили эффективность очистки газа в циклоне (η) по формуле (25):

$$\eta = \frac{1 + \Phi(X)}{2} \quad (25)$$

$$\eta = \frac{1 + 0,67}{2} = 0,84$$

8) Определили коэффициент гидравлического сопротивления циклона по формуле (26):

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500} \quad (26)$$

где K_1 – поправочный коэффициент на диаметр циклона;

K_2 – поправочный коэффициент на запыленность газа;

ξ_{500} – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм.

$$\xi = 1 \cdot 0,90 \cdot 155 = 139,5$$

9) Вычислили гидравлическое сопротивление (ΔP , Па) циклона по формуле (27):

$$\Delta P = \xi \frac{\rho \cdot \omega_p^2}{2} \quad (27)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³;

ω_p – скорость газа в циклоне, м/с.

$$\Delta P = 139,5 \cdot \frac{1,3 \cdot 3,82^2}{2} = 1323 \text{ Па}$$

9) Расчет мощности привода подачи газа. Величина гидравлического сопротивления и объемный расход (Q м³/с) очищаемого газа определили мощность (N , Вт) привода устройства для подачи газа к циклону по формуле (28):

$$N = \frac{K_3 \cdot \Delta P \cdot Q}{\eta_M \cdot \eta_B} \quad (28)$$

где K_3 – коэффициент запаса мощности ($K_3 = 1,2$);

η_M – КПД передачи мощности от электродвигателя к вентилятору
($\eta_M = 0,8$);

η_B – КПД вентилятора ($\eta_B = 0,8$)

$$N = \frac{1,2 \cdot 1323 \cdot 2,96}{0,8 \cdot 0,8} = 7,3 \text{ кВт}$$

10) Определили концентрацию пыли на выходе из циклона, г/м³ по формуле (29):

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}} \cdot (1 - \eta) \quad (29)$$

$$C_{\text{вых}} = 86,365 \cdot (1 - 0,84) = 13,82 \text{ г/м}^3$$

Коэффициент очистки газов позволяет снизить запыленность газа на 84 %, что не является наилучшим методом очистки газа от взвешенных частиц.

2.3.2 Расчет скруббера

Расчет скруббера заключается в определении эффективности очистки, расхода жидкости на очистку, параметров газового потока на выходе из скруббера (объема и температуры газа) и геометрических размеров скруббера.

Для расчета скруббера при очистке газа от взвешенных частиц выбран аппарат, установленный на производстве.

Схематически аппарат разделен на 2 части переливной тарелкой. В нижней части скруббера установлено 4 решетчатые тарелки, в верхней – 10 тарелок.

Расход газа $V_r = 4,93 \text{ м}^3/\text{с}$;

Конечная температура $T_2 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$;

Начальное влагосодержание газа $y_1 = 50 \text{ г}/\text{м}^3$;

Рабочее давление газа в скруббере $P = 110,3 \text{ кПа}$;

Объемный коэффициент теплоотдачи $K_0 = 100 \text{ Вт}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$

Температура отходящих газов на входе в скруббер $T_1 = + 400 \text{ }^\circ\text{C}$;

Давление воды перед форсунками $p_{\text{ж}} = 4 \text{ бар}$

1) Рассчитаем массу сухого газа по формуле 30:

$$V_{\text{oc}} = \frac{V_r \cdot T_0 \cdot P}{T_1 \cdot P_0} \quad (30)$$

где T_0 – температура газа при нормальных условиях ($273 \text{ }^\circ\text{K}$);

T_1 – температура газа на входе в газоочистной аппарат;

P_0 – нормальное ($101,3 \text{ кПа}$) давление газа.

$$V_{\text{oc}} = \frac{4,93 \cdot 273 \cdot 110,3}{673 \cdot 101,3} = 2,17 \text{ м}^3/\text{с}$$

2) Найдем количество тепла, отнимаемого от газа по формуле 31:

$$Q = V_{\text{oc}} \cdot c_r \cdot (T_1 - T_2) \quad (31)$$

где T_2 – заданная температура газа на выходе из аппарата;

c_r – изобарная теплоемкость газа ($c_r = 1,3 \text{ кДж}/\text{кг}$).

$$Q = 2,17 \cdot 1,3 \cdot (400 - 70) = 930,93 \text{ кДж}/\text{ч}$$

3) Найдем энтальпию насыщенного пара по формуле 32:

$$i_n = 2480 + 1,96 \cdot T_{\text{ср}} \quad (32)$$

где T_{cp} – средняя температура газа в скруббере и рассчитывается по формуле 33:

$$T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (33)$$

$$T_{cp} = \frac{400 + 70}{2} = 235 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$i_n = 2480 + 1,96 \cdot 235 = 2940,6 \text{ кДж/кг}$$

4) Найдем расход воды на обработку газа в скруббере по формуле 34:

$$M_{ж} = \frac{Q}{\varphi \cdot (i_n - i_k) + (1 - \varphi)(i_k - i_n)} \quad (34)$$

где Q – количество тепла, отнимаемого от газов в скруббере, определяемое по формуле (4);

φ – коэффициент испарения (для низконапорных скрубберов принимаемый равным $= 0,5$, а для высоконапорных равным $= 1$);

i_n и i_k – энтальпия начальная и конечная энтальпия воды ($i_n = 84$ кДж/кг, а $i_k = 230$ кДж/кг).

$$M_{ж} = \frac{930,93}{0,5 \cdot (2940,6 - 84) + (1 - 0,5)(230 - 84)} = 0,62 \text{ кг/с}$$

5) Рассчитаем параметр расхода энергии на обработку жидкостью определенного объема газа по формуле 35:

$$K_q = \Delta P_{ап} + p_{ж} \frac{10^{-3} \cdot M_{ж}}{V_{г}} \quad (35)$$

где $\Delta P_{ап}$ – гидравлическое сопротивление пылеулавливающего аппарата, принимаемое равным 250 Па ;

$p_{ж}$ – заданное давление распыляемой жидкости.

$$K_q = 250 + 110,3 \frac{10^{-3} \cdot 0,62}{4,93} = 250,01$$

6) Найдем степень эффективности скруббера по формуле 36:

$$\eta = 1 - \exp(-B \cdot K_q^\chi) \quad (36)$$

где B и χ – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида улавливаемой пыли ($B = 0,0988$, $\chi = 0,0988$).

$$\eta = 1 - \exp(-0,0988 \cdot 250,01^{0,4663}) = 0,73$$

Коэффициент очистки газов позволяет снизить запыленность газа на 73 %.

2.3.3 Расчет электрофильтра

При расчете электрофильтра учитываются его эффективность очистки, пропускная способность и потребляемая мощность на создание заряда и силы тока, подаваемые на электроды [33].

Для расчета принимаем электрофильтр типа УГТ.

Оптимальная скорость газа $w_r = 1,5 \text{ м/с} = 0,0002 \text{ м/ч}$;

Расход газа $V_r = 4,93 \text{ м}^3/\text{с}$;

Напряженность электрического поля электрофильтра $E = 250 \text{ кВм}$;

Длина активного поля $L = 3,85 \text{ м}$;

Расстояние между электродами $H = 0,3 \text{ м}$;

Приложенное напряжение $U = 80 \text{ кВ}$.

1) Рассчитаем скорость дрейфа частиц пыли для крупнодисперсных аэрозолей по формуле 37:

$$w_d = 0,118 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{E^2 \cdot r}{\mu} \quad (37)$$

где E – напряженность электрического поля электрофильтра;

r – радиус улавливаемых частиц (примем $r = 12 \text{ мкм}$);

μ – вязкость газа (принимаем $\mu = 17 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$).

$$w_d = 0,118 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{250^2 \cdot 12}{17 \cdot 10^{-6}} = 0,52 \text{ м/с}$$

2) Найдем эффективность очистки электрофильтра по формуле 38:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2 \cdot w_d \cdot L}{w_r \cdot H}\right) \quad (38)$$

где w_r – скорость движения газа в;

L – длина активного поля осадительных электродов;

H – в пластинчатом фильтре межэлектродное расстояние.

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2 \cdot 0,52 \cdot 3,85}{1,5 \cdot 0,3}\right) = 0,99$$

3) Рассчитаем силу тока, подаваемого на электроды по формуле 39:

$$i_0 = 0,5 \cdot E^2 \cdot r^2 \quad (39)$$

$$i_0 = 0,5 \cdot 250^2 \cdot (12 \cdot 10^{-6})^2 = 0,45 \text{ мкА}$$

4) Рассчитаем пропускную способность электрофильтра по формуле 40:

$$F_A = \frac{V_r}{w_r} \quad (40)$$

$$F_A = \frac{4,93}{0,0002} = 24650 \text{ м}^3/\text{ч}$$

5) По формуле 41 потребляемую мощность на создание разряда в электрофильтре:

$$N_k = i_0 \cdot F_A \cdot U \quad (41)$$

где U – приложенное напряжение.

$$N_k = 0,45 \cdot 10^{-6} \cdot 24650 \cdot 80 = 0,8 \text{ кВт}$$

Коэффициент очистки газов позволяет снизить запыленность газа на 99 % .

В таблице 6 представлен сравнительный анализ эффективности, существующей и предлагаемой технологий.

Таблица 6– Сравнительный анализ

Показатель	Аппарат		
	Циклон ЦН-15	Скруббер С-17	Электрофильтр УГТ
Степень очистки, %	84	73	99
Конечная концентрация, г/с	$C_k = \frac{\eta \cdot C_n}{100}$		
	ПДВ = 0,10314 г/с		
	0,01893	0,03195	0,00118

Вывод по разделу:

В расчетной части представлена принципиальная технологическая схема предлагаемой технологии очистки контактного газа от катализаторной пыли с использованием электрофильтра.

Проведен подбор технологического оборудования. Рассчитан материальный баланс процесса дегидрирования изобутана. Проведен технологический расчет существующей и предлагаемой технологии очистки отходящих газов от катализаторной пыли. Расчетным путем подтверждена наивысшая степень очистки газа с использованием электрофильтра.

3 Эколого-экономическое обоснование

3.1. Анализ опасности образующихся отходов

На производстве изобутилена путем дегидрирования изобутана образуются отходы в виде отработанного катализатора и жидкого шлама. Шлам образуется в результате мокрой очистки газов от катализаторной пыли в скруббере. Данный вид отхода транспортируется на специальные полигоны. После того как резервуары переполняются – их подвергают консервации, что вызывает техногенную нагрузку на экологическую среду в виде загрязнения подземных вод, выделения ядовитых паров и утилизации воды, содержащей ионы хрома больших концентраций. На рисунке 11 представлено месторасположение полигона предприятия ООО «Тольяттикаучук».

Отходы алюмохромового катализатора при мокрой очистке газов дегидрирования углеводородного сырья для получения мономеров в производстве каучуков синтетических имеют код федерального классификатора отходов – 3 16 010 71 39 4 и относится к 4 классу опасности. Агрегатное состояние данного отхода – это дисперсная система.

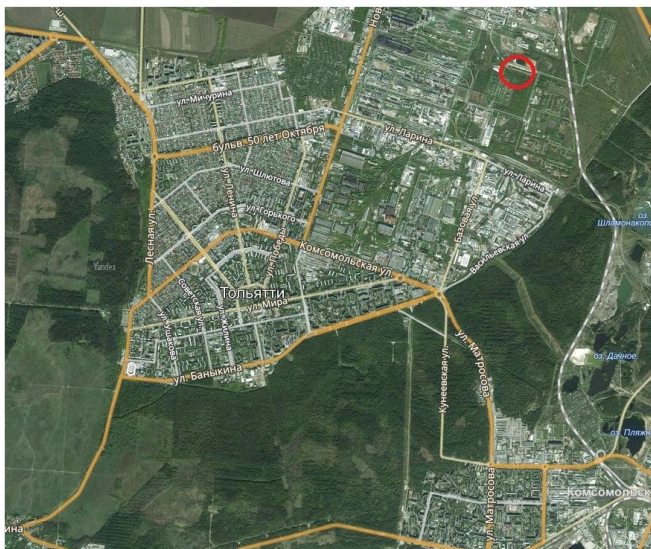


Рисунок 11 – Полигон хромосодержащих отходов
ООО «Тольяттикаучук»

Очистные предприятия г. Тольятти не способны принимать объемы сточных вод, образующиеся при данном технологическом процессе в связи с трудностями соблюдения санитарных норм по содержанию вредных веществ в воде, что приводит к увеличению стоимости очистки сточных вод.

Помимо жидких отходов в процессе дегидрирования изобутана образуются промышленные выбросы, которые не соответствуют нормам экологической безопасности.

3.2 Ущерб почвенным ресурсам от захоронения шлама на полигоне

Расчет вреда, причиненного почвам отходами, осуществляется согласно «Методике исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды», утвержденной Приказом Минприроды России от 08.07.2010 №238 (в редакции Приказа Минприроды России от 11.07.2018 № 316) по формуле 42 [10]:

$$\text{УЩ} = \text{УЩ}_{\text{загр}} + \text{УЩ}_{\text{отх}} + \text{УЩ}_{\text{перекр}} + \text{УЩ}_{\text{сн}} + \text{УЩ}_{\text{уничт}}, \quad (42)$$

где УЩ – общий ущерб вреда, причиненного почвам;

$\text{УЩ}_{\text{загр}}$ – размер вреда при загрязнении почв загрязняющими веществами, руб.;

$\text{УЩ}_{\text{отх}}$ – размер вреда в результате складирования отходов потребления и производства, руб.;

$\text{УЩ}_{\text{перекр}}$ – размер вреда в результате образования полигона, руб.;

$\text{УЩ}_{\text{сн}}$ – размер вреда в результате снятия верхнего плодородного слоя почвы, руб.;

$\text{УЩ}_{\text{уничт}}$ – размер вреда в результате разрушения верхнего плодородного слоя почвы, руб.

1) Рассчитаем размер вреда при загрязнении почв загрязняющими веществами осуществляется по формуле 43:

$$\text{УЩ}_{\text{загр}} = \text{СЗ} \cdot \text{S} \cdot \text{K}_r \cdot \text{K}_{\text{исп}} \cdot \text{T}_x \cdot \text{K}_{\text{мпс}}, \quad (43)$$

где СЗ – безразмерная степень загрязнения (примем СЗ = 1,5);

S – площадь загрязненного участка, м^2 (примем площадь резервуара $S = 13000 \text{ м}^2$);

K_r – безразмерный показатель, характеризующий глубину загрязнения почв (примем $K_r = 0,5$);

$K_{\text{исп}}$ – показатель, характеризующий категорию земель на которых располагают отходы стекла (примем $K_{\text{исп}} = 1$);

T_x – такса для исчисления размера вреда, руб./м^2 (Размер T_x , таксы для исчисления размера вреда принимаем равную 500 руб./м^2 для лесостепной зоны, как наиболее характерную для Самарской области» [11]);

$K_{\text{мпс}}$ – показатель, учитывающий мощность плодородного слоя почвы (примем $K_{\text{мпс}} = 1$);

$$\text{УЩ}_{\text{загр}} = 1,5 \cdot 13000 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 500 \cdot 1 = 4875000 \text{ руб.}$$

2) Рассчитаем размер вреда в результате складирования отходов по формуле 44:

$$\text{УЩ}_{\text{отх}} = \sum_{i=1}^n (M_i \cdot T_{\text{отх}}) \cdot K_{\text{исп}} \cdot K_{\text{мпс}}, \quad (44)$$

где $\text{УЩ}_{\text{отх}}$ – размер вреда (руб.);

M_i – масса отходов с одинаковым классом опасности, (т);

$T_{\text{отх}}$ – такса для исчисления размера вреда, причиненного почвам в результате размещения отходов, руб./т ($T_{\text{отх}} = 13000 \text{ руб./т}$).

Согласно нормативу образования твердых и жидких отходов на предприятии ООО «Тольяттикаучук» количество отходов алюмохромового катализатора при мокрой очистке газов дегидрирования углеводородного сырья для получения мономеров в производстве каучуков синтетических из скрубберов С-8, С-17 принимаем $3002,3 \text{ т/год}$.

$$\text{УЩ}_{\text{отх}} = 3002,3 \cdot 13000 \cdot 1 \cdot 1 = 39029900 \text{ руб.}$$

3) Рассчитаем размер вреда в результате снятия верхнего плодородного слоя почвы по формуле 45:

$$УЩ_{\text{перекр}} = S \cdot K_r \cdot K_{\text{исп}} \cdot T_x \cdot K_{\text{мпс}}, \quad (45)$$

$$УЩ_{\text{перекр}} = 13000 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 500 \cdot 1 = 3250000 \text{руб.}$$

4) Найдем размер вреда в результате снятия верхнего плодородного слоя почвы по формуле 46:

$$УЩ_{\text{сн}} = S \cdot K_{\text{исп}} \cdot T_x \cdot K_{\text{мпс}}, \quad (46)$$

$$УЩ_{\text{сн}} = 13000 \cdot 1 \cdot 500 \cdot 1 = 6500000 \text{руб.}$$

5) Рассчитаем размер вреда в результате разрушения верхнего плодородного слоя почвы по формуле 47:

$$УЩ_{\text{уничт}} = 25 \cdot S \cdot K_{\text{исп}} \cdot T_x \cdot K_{\text{мпс}}, \quad (47)$$

$$УЩ_{\text{уничт}} = 25 \cdot 13000 \cdot 1 \cdot 500 \cdot 1 = 162500000 \text{руб.}$$

Подставим полученные размеры ущербов в формулу 12:

$$\begin{aligned} УЩ &= 4875000 + 39029900 + 3250000 + 6500000 + 162500000 \\ &= 216214900 \text{руб.} \end{aligned}$$

3.3 Расчет платы за размещение отходов

Помимо платы за ущерб, причинённый почвам необходимо учитывать плату за размещение отходов.

Сумма за размещение отходов назначается в зависимости от класса опасности отхода. Размещение отходов может производиться в пределах лимита и сверх установленных лимитов [27].

Ставки платы за размещение отходов отражены в постановлении правительство Российской Федерации № 913 от 13.09.2016 года.

Рассчитаем плату в пределах установленного лимита по формуле 48:

$$П_{\text{л}} = C \cdot M \cdot 1,9 \cdot 1,32 \quad (48)$$

где C – ставка оплаты за вывоз 1 т отхода, т;

M – масса отходов к вывозу, т;

1,9 – почвенный коэффициент для Самарской области;

1,32 – коэффициент инфляции в 2024 году от 2018 года.

$$P_{\text{л}} = 663,2 \cdot 3002,3 \cdot 1,9 \cdot 1,32 = 4993742 \text{ руб.}$$

Рассчитаем плату сверх установленного лимита по формуле 49:

$$P_{\text{св}} = C \cdot M \cdot 1,9 \cdot 1,32 \cdot 5 \quad (49)$$

где 5 – коэффициент за сверхлимитное размещение.

$$P_{\text{л}} = 663,2 \cdot 3002,3 \cdot 1,9 \cdot 1,32 \cdot 5 = 24968712 \text{ руб.}$$

Найдем общую плату за размещение отходов и нанесение ущерба почвам по формуле 50:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{л}} + P_{\text{св}} + УЩ_{\text{уничт}} \quad (50)$$

$$P_{\text{общ}} = 4993742 + 24968712 + 216214900 = 246177354 \text{ руб.}$$

3.4 Экономический расчет затрат на новое оборудование

При существующей системе очистки газов и с ежегодным увеличением производственных мощностей по изобутилену оборудование не выдерживает предполагаемых нагрузок. Поэтому появилась потребность в замене устаревшего оборудования очистки газов, чтобы в итоге сократить расходы на постоянные простои и ремонты, а также упростить технологическую схему и затраты на утилизацию отработанного алюмохромового катализатора.

Произведем расчет капитальных затрат для определения экономического эффекта установки электрофильтра.

1) Рассчитаем капитальные затраты на покупку и установку нового оборудования по формуле 51:

$$K_{\Pi} = K_{\text{пок}} + K_{\text{зат}} \quad (50)$$

где $K_{\text{пок}}$ – затраты на покупку нового оборудования;

$K_{\text{зат}}$ – затраты, сопутствующие оборудованию.

Стоимость электрофильтра марки УГ принимаем $K_{\text{пок}} = 4000000$ руб.

Затраты, сопутствующие транспортировке и монтажу оборудования, определяются по формуле 51:

$$K_{\text{зат}} = K_{\text{пр}} \frac{K_{\text{тран}} + K_{\text{уст}} + K_{\text{техн}} + K_{\text{кип}} + K_{\text{пуск}} + K_{\text{дем}}}{100\%} - K_{\text{ост}} \quad (51)$$

где $K_{\text{пр}}$ – затраты на проектирование объекта;

$K_{\text{тран}}$ – затраты на транспортировку оборудования (принимаем 2 %);

$K_{\text{уст}}$ – затраты на установку оборудования (принимаем 10 %);

$K_{\text{техн}}$ – затраты на обвязку трубопроводом (принимаем 10 %);

$K_{\text{кип}}$ – затраты на установку датчиков КИПиА (принимаем 5 %);

$K_{\text{пуск}}$ – затраты на пуско-наладочные работы (принимаем 2 %);

$K_{\text{дем}}$ – затраты на демонтаж старого оборудования (принимаем 5 %);

$K_{\text{ост}}$ – прибыль с реализации старого оборудования.

В связи с тем, что старое оборудование не будет реализоваться, а направляется на склад предприятия, то $K_{\text{ост}} = 0$ руб.

В связи с тем, что на проектирование объекта используются трудозатраты инженера-конструктора 1 категории, рассчитаем затраты на проект по формуле 52:

$$K_{\text{пр}} = T_{\text{пр}} \cdot ЗП \quad (52)$$

где ЗП – заработная плата инженера-конструктора 1 категории (принимаем 281 руб/ч).

$T_{\text{пр}}$ – трудочасы (принимаем 640 часов).

$$K_{\text{пр}} = 640 \cdot 244 = 179840 \text{ руб}$$

$$K_{\text{зат}} = 179840 \frac{2 + 10 + 10 + 5 + 2 + 5}{100\%} - K_{\text{ост}} = 61146 \text{ руб}$$

$$K_{\Pi} = 4000000 + 61146 = 4061146 \text{ руб.}$$

Выводы по разделу:

Захоронение отработанного алюмохромового катализатора наносит ущерб окружающей среде в размере 246177354 руб. Предлагаемая технология очистки газа от катализаторной пыли позволяет сэкономить около 240 млн. руб. Таким образом, использование электрофильтра при очистке газа от пыли позволяет соблюсти экологические нормативы промышленных выбросов в атмосферу и устранить проблему образования шлама после мокрой очистки газов скрубберами. Сухой способ очистки не уступает мокрому по эффективности, а также данный способ позволяет сохранить производственное оборудование в целости без воздействия коррозии. И главное преимущество предлагаемой технологии цикличное использование уловленного катализатора в получении изобутилена.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе изучена технология получения изобутан–изобутиленовой фракции. Рассмотрена существующая схема обезвреживания отходящих газов регенерации в производстве изобутилена на ООО «Тольяттикаучук».

В процессе анализа технологического регламента производства было установлено, что очистка газов происходит путем осуществления мокрой очистки в результате чего образуется шлам отработанного алюмохромового катализатора, который нерационально приводит к затратам, связанным непосредственно с его утилизацией и повышенной нагрузкой на окружающую среду.

В первом разделе обсуждаются основные методы очистки загрязнённых газов от взвешенных частиц согласно современным требованиям к наилучшим доступным технологиям. Также был произведен литературный обзор методов очистки высокотемпературных газов от пыли. В ходе патентного поиска было установлено, что наиболее эффективным альтернативным способом очистки является применение электрофильтра, который способен достигать эффективности очистки до 99,9%.

В расчетной части представлена принципиальная технологическая схема предлагаемой технологии очистки контактного газа от катализаторной пыли с использованием электрофильтра. Проведен подбор технологического оборудования. Рассчитан материальный баланс процесса дегидрирования изобутана. Проведен технологический расчет существующей и предлагаемой технологии очистки отходящих газов от катализаторной пыли. Расчетным путем подтверждена наивысшая степень очистки газа с использованием электрофильтра.

В экологическом обосновании работы, представлено, что захоронение отработанного алюмохромового катализатора наносит ущерб окружающей среде в размере 246177354 руб. Предлагаемая технология очистки газа от

катализаторной пыли позволяет сэкономить около 240 млн. руб. Таким образом, использование электрофилтра при очистке газа от пыли позволяет соблюдать экологические нормативы промышленных выбросов в атмосферу и устранить проблему образования шлама после мокрой очистки газов скрубберами. Сухой способ очистки не уступает мокрому по эффективности, а также данный способ позволяет сохранить производственное оборудование в целости без воздействия коррозии.

В результате:

- исчезает проблема утилизации токсичного шлама содержащего катализаторную пыль, в состав которой входят оксиды хрома;
- отсутствует необходимость использования подготовленной воды в скруббере в размере 10-15 м³/час;
- сокращается технологическое оборудование, используемое для очистки газа (скруббер, насосы).

Таким образом, предлагаемая технология очистки дымовых газов с применением электрофилтра обладает главным преимуществом, которое заключается в том, что модернизация позволяет циклично использовать уловленный катализатор в получении изобутилена, а также в уменьшении загрязняющих веществ выбросов в атмосферу.

Список используемых источников

1. Белозерова О.В. Основы нефтехимии: учебное пособие / О.В. Белозерова. – Иркутск: ИРНТУ, 2021. – 92 с.
2. Гулиянц С.Т. Инновационные технологии в нефтехимии и решение экологических проблем: монография / С.Т. Гулиянц. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. – 238 с.
3. Диденко Л.П., Колесникова А.М., Воронежский М.С., Савченко В.И., Домашнев И.А., Семенцова Л.А. Алюмохромовый катализатор дегидрирования пропана, приготовленный модифицированным методом. // Катализ в промышленности. 2011. № 2. С. 7-14.
4. Егорова Г.И. Отходы нефтехимических производств: монография / Г.И. Егорова, И.В. Александрова, А.Н. Егоров. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – 126 с.
5. Емельянычева Е.А. Алкилирование изоалканов алкенами: учебное пособие / Е.А. Емельянычева, Ю.Х. Усманова. – Казань: КНИТУ, 2022. – 104 с.
6. Катализатор для дегидрирования парафиновых углеводородов и способ его применения. [Электронный ресурс] URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2432203C1_20111027 (дата обращения: 25.10.2024)
7. Климентова Г.Ю. Технологии повышения экологичности производств нефтепереработки и нефтехимии / Г.Ю. Климентова, М.В. Журавлева. – Казань: КНИТУ, 2022. – 120 с.
8. Котельников Г.Р., Беспалов В.П., Каталитические процессы и катализаторы ОАО «ЯРСИНТЕЗ», Катализ в промышленности. 2007 № 2 С. 59-63.
9. Кузьминых К.Г. Методы исследований характеристик твердых катализаторов: учебное пособие / К.Г. Кузьминых, В.З. Пойлов, Е.О. Кузина. – Пермь: ПНИПУ, 2012. – 64 с.

10. Методика исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды», утвержденной Приказом Минприроды России от 08.07.2021 №238 (в ред. Приказа Минприроды России от 11.07.2018 № 316).

11. Микросферические катализаторы [Электронный ресурс] URL: <https://www.dslib.net/kataliz/mikrosfericheskie-katalizatory.html> (дата обращения: 25.10.2024).

12. Общая химическая технология и химические реакторы (теория и практика): учебное пособие / Н.Ю. Санникова, А.С. Губин, А.А. Кушнир [и др.]. – Воронеж: ВГУИТ, 2023. – 103 с.

13. Окислительное дегидрирование изобутана в изобутен на Ni-V-Sb-алюмооксидном катализаторе / В.П. Висловский, Р.М. Талышинский, В.Ф. Третьяков [и др.] // Тонкие химические технологии. – 2009. – № 1. – С. 34-41.

14. Патент № RU2003114542А Российская Федерация, C08F 136/08(2000.01), C08C 2/06(2000.01). Способ получения изопренового каучука. Заявка 2003114542/04: заявл. 15.05.2003: опубл. 27.11.2004 / Щербань Г.Т. – 6 с.

15. Патент № RU2007209C1 Российская Федерация, B01D 53/14. Установка для очистки газа. Заявка 5033294/26: заявл. 20.02.1992: опубл. 15.02.1994 / Акимов М.В, Фахитов, Цегельский В.Г. – 4 с.

16. Патент № RU2035444C1 Российская Федерация, C07C 5/42, 11/09. Способ конверсии изобутана в изобутилен. Заявка 93018269/04: заявл. 09.04.1993: опубл. 20.05.1995 / Мирзабекова С.Р., Мамедов А.Х., Крылов О.В. - 6 с.

17. Патент № RU2122472C1 Российская Федерация, B03C 3/00. Способ очистки газов от пыли и электрофильтр для его осуществления. Заявка 97115108/25: заявл. 04.09.1997: опубл. 27.11.1998 / Чистяков Ю.Л. – 5 с.

18. Патент № RU2175262C2 Российская Федерация, B01D 53/00. Способ очистки окружающей среды от отходящих газов, пыли производств и

устройство для его осуществления. Заявка 99103246/12: заявл. 17.02.1999: опубл. 27.10.2001 / Казаков В.М. – 7 с.

19. Патент № RU22531313C1 Российская Федерация, B01D 47/00 (2006.01), B01C 5/18 (2006.01). Способ очистки газов от пыли. Заявка 2013127855: заявл. 18.06.2013: опубл. 20.10.2014 / Павловец В.М. - 7 с.

20. Патент № RU2373988C1 Российская Федерация, B01D 45/14 (2006.01). Устройство и способ мокрой очистки газов. Заявка 2008124385: заявл. 16.06.2008: опубл. 27.11.2009 / Баев В.К. - 7 с.

21. Патент № RU2627667C1 Российская Федерация, B01J 21/06 (2006.01), B01J 23/26 (2006.01), C07C 5/333 (2006.01). Катализатор с низким содержанием оксида хрома для дегидрирования изобутана и способ дегидрирования изобутана с его использованием. Заявка 2016146998: заявл. 30.11.2016: опубл. 09.08.2017 / Бугрова Т.А., Салаев М.А., Мамонтов Г.В. - 7 с.

22. Патент № RU2636488C1 Российская Федерация, B01D 35/06 (2006.01), B03C 3/08 (2006.01). Способ очистки газов от пыли и электрофильтр для его осуществления. Заявка 2016105988: заявл. 20.02.2016: опубл. 23.11.2017 / Пикулик Н.В., Чекалов Л.В., Санаев Ю.И., Гузаев В.А. - 13 с.

23. Патент № RU2773127C1 Российская Федерация, B01J 8/00 (2006.01), C07C 5/333 (2006.01). Регенератор системы дегидрирования парафиновых углеводородов $C_3 - C_5$ с кипящим слоем катализатора. Заявка 202112230: заявл. 26.07.2021: опубл. 30.05.2022 / Комаров С.М., Харченко А.С. - 15 с.

24. Постоянный технологический регламент производства изобутан–изобутиленовой фракции. ТР–БК–2,3–32–13. Производственная инструкция ПИ–БК–2–08–13 «По обслуживанию отделения очистки контактного газа от катализаторной пыли, охлаждения и санитарной очистки дымового газа из установки БК–2» ООО «Тольяттикаучук», Тольятти, 2015. – 120 с.

25. Производственная инструкция ПИ–БК–2–10–12 «По обслуживанию реакторного блока установки БК–2» ООО «Тольяттикаучук», Тольятти, 2015. –117 с.
26. Производственная инструкция ПИ–БК–2–13–12 «По подготовке оборудования к ремонту установки БК–2» ООО «Тольяттикаучук», Тольятти, 2015. – 35 с.
27. Производственная инструкция ПИ–БК–2–14–13 «По приему оборудования установки БК–2 из ремонта» ООО «Тольяттикаучук», Тольятти, 2015. –10 с.
28. Потехин В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки: учебник / В.М. Потехин, В. В. Потехин. – 3-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 896 с.
29. Потехин В.М. Химия и технология углеводородных газов и газового конденсата: учебник для вузов / В.М. Потехин. – 4-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 712 с.
30. Разинов А.И. Процессы и аппараты химической технологии / А.И. Разинов, А.В. Клинов, Г.С. Дьяконов. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 688 с.
31. Разработка научно-технологических основ производства катализаторов дегидрирования [Электронный ресурс] URL: https://revolution.allbest.ru/manufacture/00882736_0.html (дата обращения: 25.10.2024).
32. Руснак И.Н. Методы исследования каталитических процессов. Практикум: учебное пособие / И.Н. Руснак, С.А. Прохоров, И.В. Ошанина. – Москва: РТУ МИРЭА, 2022. – 58 с.
33. Самуилов А.Я. Промышленная органическая химия. Катионные процессы / А.Я. Самуилов, Я.Д. Самуилов. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 296 с.
34. Сепарационное устройство с дугообразными элементами для улавливания частиц катализатора в реакторе с псевдоожиженным слоем / В.Э.

Зинуров, V.E. Zinurov, Э.И. Салахова [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2024. – № 4. – С. 62-66.

35. Сибаров Д.А. Катализ, каталитические процессы и реакторы: учебное пособие для вузов / Д.А. Сибаров, Д.А. Смирнова. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 200 с.

36. Сибаров Д.А. Катализ, каталитические процессы и реакторы: учебное пособие для вузов / Д.А. Сибаров, Д. А. Смирнова. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 200 с.

37. Совместное дегидрирование парафиновых углеводородов C_4 на поверхности алюмохромового катализатора / Л.З. Касьянова, А.А. Исламутдинова, Э.К. Аминова, Д.С. Бычек // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2022. – № 4. – С. 103-116.

38. Шлыков С.А. Катализ в промышленности. Теория и прикладные каталитические процессы: учебное пособие / С.А. Шлыков. – Иваново: ИГХТУ, 2018. – 101 с.

39. Dehydrogenation process and catalyst [Электронный ресурс]. URL: <https://www.freepatentsonline.com/2902522.html> (Дата обращения: 28.09.2024).

40. El-Idrissi, Oxidative dehydrogenation of ethane over Cr/TiO₂ modified by phosphorus / J. El-Idrissi, M. Kacimi, F. Bozon-Verdurazb, M. Ziyad // Catalysis Letters. – 1998. – V. 56. – p. 221.

41. Marcilly, Ch. The activity of true Cr₂O₃-Al₂O₃ solid solutions in dehydrogenation / Ch. Marcilly, B. Delmon // J. Catal. – 1972. – V.24. – p.336.

42. Oxidative dehydrogenation in the presence of chlorine [Электронный ресурс]. URL: <https://www.freepatentsonline.com/3308198.html> (Дата обращения: 28.09.2024).

43. Patent № US005386074F United States of America, CO7C 5/327. Catalytic dehydrogenation of alkanes. Application 100595: app. 30.07.1993: date of Patent: 31.01.1995 / Vincent A. Durante, James E. Lyons, Darrell W. Walker. – p. 4.

44. Patent № US4176140 United States of America, CO7C 11/12. Dehydrogenation of hydrocarbons with zinc titanate catalyst, Application 844931: app. 27.10.1977: date of Patent: 27.11.1979 / Brent J. Bertus, Daurell W. Walker. – p. 7.

45. Patent № US4766266 United States of America, C07C 5/333. Dehydrogenation of isobutane, Application 797559: app. 13.11.1985: date of Patent: 23.08.1988 / Sargia Khoobiar, Kinnelon N.J. – p. 4.

46. Patent № US5476981 United States of America, CO7C 5/32. Oxidative dehydrogenation of hydrocarbons with sold superacid catalyst, Application 174733: app. 29.12.1993: date of Patent 19.12.1995 / Benjjamin S. Umansky, Chao-Yang Hsu. – p. 4.

47. Patent № WO2024/133030A1 India, B01J 23/26 (2006/01). Chromium alumina catalysts for paraffin dehydrogenation. Application PCT/EP2023/086282: app. 22.12.2022: date of Patent: 18.12.2023 / Devassy Biju Maippan, Nair Vinod Sankaran, Saravanan Velayutham, Ps Mahabala. – p. 23.

48. Valuable Recovery Technology and Resource Utilization of Chromium-Containing Metallurgical Dust and Slag [Электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/374820912_Valuable_Recovery_Technology_and_Resource_Utilization_of_Chromium-Containing_Metallurgical_Dust_and_Slag_A_Review (дата обращения: 25.10.2024).