УДК 665.6/7 DOI 10.55421/1998-7072_2025_28_2_79

**Н. С. Митрофанов, А. В. Воротынцев**

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ФАКЕЛЬНЫХ ГАЗОВ НА НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

*Ключевые слова: ресурсосбережение, нефтеперерабатывающие и нефтехимические предприятия, факельные газы, лёгкие углеводороды, углекислый газ, сероводород, диоксид серы, парниковые газы, выбросы, абсорбция, газофракционирование, экологический эффект, возобновляемые источники энергий, моделирование технологии.*

*Каждая углеводородная фракция, полученная из нефти и вырабатываемая на нефтегазоперерабатывающем предприятии, подвергается дальнейшим преобразованиям в другие углеводородные компоненты для получения товарных продуктов. Но, за удовлетворением спроса на рынке и стремлением к росту потребления/использования углеводородных топлив растет и наносимый вред окружающей среде, который происходит из-за сжигания некондиционных углеводородов на факельных установках с образованием различных продуктов сгорания (в т.ч. парниковых газов). Из-за антропогенного воздействия на экологию выбросы парниковых газов в атмосферу ежегодно увеличиваются, несмотря на ужесточение экологических требований, нормативных и законодательных актов, поскольку побочные продукты получаются на любых производствах, даже если они полностью отлажены в работе. Любые технологические процессы, применяемые на нефтегазоперерабатывающих производствах, в мире, изначально, не приспособлены для работы с некондиционными факельными газами, поскольку они разработаны под использование конкретного состава и объёма необходимого углеводородного сырья, а основные задачи всех имеющихся установок на сегодня – вырабатывать продукцию с максимально возможным качеством и низкой выработкой побочных продуктов. Смоделирована новая установка, способная использовать в качестве сырья некондиционные углеводородные газы нефтегазоперерабатывающего завода и возвращать полученную продукцию в производственный цикл. Установка питается от возобновляемых источников энергии, а именно от ветрогенераторов, что позволяет установке достичь полной углеродной нейтральности. Рациональное распределение ресурсов на нефтегазоперерабатывающих заводах дает экологический и экономический эффект, новая установка позволяет полностью отказаться от использования факельных установок для сжигания некондиционных углеводородных газов. Нефтегазоперерабатывающие заводы могут реализовывать продукцию с высокой добавленной стоимостью благодаря полной переработке нефтегазового сырья, внося существенный вклад в сохранение окружающей среды, снижая выбросы парниковых газов в атмосферу.*

**N. S. Mitrofanov, A. V. Vorotyntsev**

# MODELING OF FLARE GAS UTILIZATION TECHNOLOGY AT OIL AND GAS REFINERIES USING RENEWABLE ENERGY SOURCES

*Keywords: resource saving, refineries and petrochemical enterprises, flare gases, light hydrocarbons, carbon dioxide, hydrogen sulfide, sulfur dioxide, greenhouse gases, emissions, absorption, gas fractionation, environmental effect, renewable energy sources, technology modeling.*

*Each hydrocarbon fraction obtained from crude oil and produced at an oil and gas refinery is further transformed into other hydrocarbon components to produce marketable products. However, as the market demand is satisfied and the consumption/use of hydrocarbon fuels is growing, the environmental damage caused by flaring of substandard hydrocarbons with the formation of various combustion products (including greenhouse gases) is also increasing. Due to the anthropogenic impact on the environment, greenhouse gas emissions into the atmosphere are increasing every year, despite the tightening of environmental requirements, regulations and legislation, since by-products are produced at any production facilities, even if they are fully debugged in operation. Any technological processes used at oil and gas refineries in the world are not initially adapted to work with substandard flare gases, as they are designed to use a specific composition and volume of the required hydrocarbon feedstock, and the main tasks of all existing plants today are to produce products with the highest possible quality and low production of by-products. A new plant has been modeled that is capable of using substandard hydrocarbon gases from an oil and gas refinery as feedstock and returning the resulting products to the production cycle. The plant is powered by renewable energy sources, namely wind turbines, which allows the plant to achieve full carbon neutrality. Rational allocation of resources at oil and gas refineries provides environmental and economic benefits, the new unit allows to completely eliminate the use of flares for burning substandard hydrocarbon gases. Oil and gas refineries can sell products with high added value due to the complete processing of oil and gas raw materials, making a significant contribution to environmental conservation, reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere.*

## Введение

Отечественная и мировая нефтегазо-перерабатывающая промышленность, с каждым годом, стремится к увеличению глубины переработки нефтегазового сырья, улучшению качества получаемых продуктов и снижению выработки побочных продуктов, путем внедрения последних технологических разработок.

Практически каждая углеводородная фракция, полученная из нефти на технологических установках нефтегазоперерабатывающего предприятия, подвергается дальнейшим преобразованиям в другие углеводородные компоненты для получения товарных

продуктов. Но, за удовлетворением спроса на рынке и стремлением к росту потребления/использования углеводородных топлив растет и наносимый вред окружающей среде, который происходит из-за сжигания некондиционных углеводородов на факельных установках с образованием различных продуктов сгорания (в т.ч. парниковых газов).

Из-за антропогенного воздействия на экологию выбросы парниковых газов в атмосферу ежегодно увеличиваются, несмотря на ужесточение экологических требований, нормативных и законодательных актов, поскольку побочные продукты получаются на любых производствах, даже если они полностью отлажены в работе [1,2].

Мировое и цивилизованное сообщество стремится к улучшению экологической обстановке в мире, научные и лабораторные исследования во многих странах мира ведутся в активной фазе, имеются локальные и несущественные попытки улучшения, например: существуют небольшие установки, которые поглощают углекислый газ напрямую из воздуха [3]; есть установки, способные работать практически с каждой целевой углеводородной фракцией, и из каждой фракции удается выделить необходимые компоненты [4-7]; применяются на практике мембранные и абсорбционные технологии для разделения широкой газовой фракции на водород и углеводороды, или разделения углекислого газа и метана [8,9]; для переработки целевого газового сырья, хорошо зарекомендовал себя процесс пиролиза углеводородного сырья, например, этана который позволяет производить этилен – продукт, являющийся для многих химических производств основой органического синтеза, например, для производства: поливинилхлорида, полиэтилена, этанола, окись этилена, этиленгликоля и уксусной кислоты [10]; для сокращения сжигания попутного газа применяются технологий паровой конверсии углеводородов (или риформинга метана) в производстве синтез-газа, а также рассматриваются термический риформинг, плазменный риформинг и фоториформинг [11,12]; для снижения сжигания углеводородного газа (или углеводородного топлива) в печном оборудовании рассматривается применение возобновляемых источников энергий в качестве замены нагревающего печного оборудования на установках каталитического крекинга [13]; применяются блоки по утилизации водород и сероводородсодержащих нефтезаводских факельных газов [14]. Как итог – все вышеперечисленные технологические процессы, изначально, не приспособлены для работы с некондиционными факельными газами, поскольку они разработаны под использование конкретного состава и объёма необходимого углеводородного сырья, а основные задачи всех имеющихся установок на сегодня – вырабатывать продукцию с максимально возможным качеством и низкой выработкой побочных продуктов.

В настоящее время, в мире, нет технологической установки, которая бы позволила полностью работать с углеводородной газовой некондицией нефтегазоперерабатывающего предприятия, пере-рабатывая её в исходные продукты или фракции, перенаправляя обратно полученные продукты на технологические установки, полностью нивелируя работу факельных установок, с применением возобновляемых источников энергий. Для улучшения экологической обстановки в мире, путем нивелирования выбросов различных продуктов сгорания (в т.ч. парниковых газов) с факельных установок нефтегазоперерабатывающих производств требуется полная безостаточная переработка и реализация углеводородного сырья, работающая по принципу: «переработали 1 тонну сырья = получили 1 тонну продукта».

## Моделирование технологий

Поскольку, для решения проблемы утилизации факельных газов, на нефтегазоперерабатывающих предприятиях, будет задействовано большое число процессов, например, таких как: адсорбция, абсорбция, ректификация, дегидрирование и т.д. - тогда все эти процессы должны быть объединены в рамках одной отдельной установки. Поэтому, моделирование технологий утилизации факельных газов, на нефтегазоперерабатывающих предприятиях, будет представлять из себя модель будущей технологической установки, где в рамках одной установки решается поставленная цель.

Цель работы – смоделировать технологию утилизации факельных газов на нефтегазоперерабатывающих предприятиях с применением возобновляемых источников энергий, которая позволит убрать потери ценных углеводородных компонентов в результате сжигания факельных газов.

Для построения модели новой установки необходимо определится, с каким нефтегазоперерабатывающим производством (НГПП) новая установка будет, теоретически, связана в производственном цикле, поскольку каждое нефтегазоперерабатывающее предприятие имеет свой набор действующих установок, соответственно, каждое предприятие будет вырабатывать индивидуальный состав факельных газов, сжигающихся на факельных установках.

В качестве производственного объекта, для моделирования новой установки, был взят один из крупнейших предприятий в Российской федерации нефтеперерабатывающий завод ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез», усредненный состав производимых факельных газов предприятием представлен в таблице 1. Работа факельных установок за 1 год эквивалентна 300 дням или 7200 часов.

Согласно таблице 1, в составе факельного газа присутствуют нежелательные компоненты, такие как $CO_2$, CO и $H_2S$, которые, при переработке на новой установке, могут негативно повлиять на качество выпускаемой продукции и привести к ускоренному износу оборудования на производстве, поэтому при моделировании установки необходимо учесть блок подготовки (факельного) сырья.

Для комплексного решения задач для моделируемой установки требуется определить основные параметры и условия работы установки, которые она должна решать в рамках конкретного нефтегазоперерабатывающего предприятия:

- принимать на переработку любое углеводородное сырьё, которое, на практике, сбрасывается на сжигание в факельные установки;

**Таблица 1 – Состав и расход факельного газа, сбрасываемого на факельные установки**

**Table 1 – Composition and flow rate of flare gas discharged to flare plants**

| Состав | % масс. | тонн/год |
|---|---|---|
| водород | 2,33 | 543,78 |
| метан | 10,45 | 2434,05 |
| этан | 6,28 | 1463,02 |
| этилен | 6,00 | 1398,28 |
| пропан | 12,56 | 2926,03 |
| пропилен | 7,95 | 1851,43 |
| н-бутан | 2,67 | 621,46 |
| бутен-1 | 0,11 | 25,89 |
| ц-бутен-2 | 0,11 | 25,89 |
| т-бутен-2 | 0,11 | 25,89 |
| i-бутан | 4,83 | 1126,39 |
| изобутилен | 0,17 | 38,84 |
| n-пентан | 0,56 | 129,47 |
| i-пентан | 0,78 | 181,26 |
| $C_5$+ $C_6$+ | 0,72 | 168,31 |
| $CO_2$ | 13,24 | 3085,20 |
| CO | 30,9 | 7200,00 |
| $H_2S$ | 0,23 | 54,00 |
| **Итого** | **100,00** | **23299,20** |

- закладывать запас дополнительного перерабатываемого сырья с других предприятий для расширения возможности комплексного снижения выбросов парниковых газов в атмосферу;

- учитывать все нежелательные компоненты, которые необходимо удалить из состава, поступающего на установку для последующей переработки;

использовать в качестве энергопитания только ту электроэнергию, которая вырабатывается из возобновляемых источников энергий. Возобновляемые источники энергий подбираются для каждого предприятия индивидуально, в зависимости от необходимого объёма планируемой вырабатываемой энергий и от погодно-климатических условий по местоположению планируемого предприятия;

- использовать все технологические возможности по дополнению или урезанию необходимых блоков в свой состав установки по усмотрению предприятия, например, дополнить блок дегидрирования в состав установки или убрать блок адсорбционной очистки водорода.

Моделирование установки производилось в симуляторе химических процессов Aspen HYSYS. Применяемые пакеты свойств: уравнение состояния Пенга-Робинсона; для колонны абсорбирования 7 – кислый газ – химические растворители, для реактора дегидрирования 25 добавлены уравнения равновесных реакции. Схема смоделированной установки представлена на рисунке 1.

Описание схемы установки. Нефтезаводской факельный газ I расходом в 3276 м$^3$/ч (3236 кг/ч или 23299,2 т/год), состав которого представлен в таблице 1, поступает на прием компрессора 1, компримируется до давления 25 атм., нагревается в электронагревателе 2 до температуры 300-380 C$^O$ и поступает в адсорбер 3 для очистки от сероводорода методом хемосорбций. В качестве адсорбента, в адсорбере 3, применяется оксид цинка (ZnO), его применение обусловлено необходимостью полного удаления сероводорода из состава перерабатываемого газа.

Обессеренный факельный газ, после адсорбера 3, расходом в 3228,5 кг/ч, состав которого, в % масс.: водород 2,34%; метан 10,47%; этан 6,29%; этилен 6,02%; пропан 12,59%; пропилен 7,96%; n-бутан 2,67%; бутен-1 0,11%; ц-бутен-2 0,11%; т-бутен-2 0,11%; i-бутан 4,85%; i-бутилен 0,17%; n-пентан 0,56%; i-пентан 0,78%; $C_5$ + и $C_6$ + суммарно 0,72%; диоксида углерода 13,27%; монооксида углерода 30,97%, охлаждается в водяном теплообменнике 4 до температуры 50-100 C$^O$, смешивается в тройнике смешения с кислородом II, где расход кислорода 571,5 кг/ч, и подается в реактор преобразования 5 для преобразования окиси углерода (CO) в диоксид углерода ($CO_2$). В качестве катализатора применяется оксид марганца ($MnO_2$) и оксид меди (CuO). (Может применяться с добавками оксида серебра $Ag_2O$ и оксида никеля $Ni_2O_3$.). Степень конверсий задаем до 100%.

Преобразованный факельный газ, после реактора преобразования 5, расходом в 3800 кг/ч, состав которого, в % масс.: водород 1,99%; метан 8,9%; этан 5,35%; этилен 5,11%; пропан 10,69%; пропилен 6,77%; n-бутан 2,27%; бутен-1 0,09%; ц-бутен-2 0,09%; т-бутен-2 0,09%; i-бутан 4,12%; i-бутилен 0,14%; n-пентан 0,47%; i-пентан 0,66%; $C_5$ + и $C_6$ + суммарно 0,62%; диоксида углерода 52,63%, охлаждается в аппарате воздушного охлаждения 6 до температуры 30-50 C$^O$ и, при давлений до 15 атм., направляется на прием, восходящим потоком, в низ колонны абсорбирования 7. Колонна абсорбирования 7 представляет собой аппарат, который предназначен для удаления из факельного газа углекислого газа методом аминовой очистки – хемосорбционный регенеративный процесс, где в качестве абсорбента используется водный раствор алканоламина. Абсорбент подают вверх колонны, нисходящим потоком, абсорбирование углекислого газа из факельного газа производится 45% водным раствором моноэтаноламина (МЭА), где насыщенный раствор моноэтаноламина, с низа колонны, выводится с установки на регенерацию МЭА. Колонна снабжена структурированной металлической насадкой FLEXIMAX, с заданным габаритом 200, диаметр секции 0,6 м. С верха колонны абсорбирования 7, по выходу, очищенный факельный газ подается в осушитель 8, где удаляется влага цеолитами вида «NaX». Степень конверсий задаем до 100%.

После осушителя 8, подготовленный факельный газ III, расходом в 1787 кг/ч, состав которого, в % масс.: водород 4,21%; метан 18,84%; этан 11,32%; этилен 10,74%; пропан 22,63%; пропилен 14,07%; n-бутан 4,81%; бутен-1 0,19%; ц-бутен-2 0,19%; т-бутен-2 0,19%; i-бутан 8,69%; i-бутилен 0,29%; n-пентан 1,00%; i-пентан 1,40%; $C_5$ + и $C_6$ + суммарно 1,30%; при давлении до 13 атм., подается в межтрубное пространство на предварительный нагрев в теплообменник 9. Далее, подготовленный факельный газ, подогревается в электронагревателе 10 до 100 C$^O$

и подается, восходящим потоком, в низ колонны абсорбирования 11. Колонна абсорбирования 11 представляет собой аппарат, который предназначен для удаления из подготовленного факельного газа таких углеводородов как: бутановую фракцию $C_4$, пентановую фракцию $C_5$ и углеводороды $C_5$+, методом абсорбций, где в качестве абсорбента используется бензиновая фракция. Абсорбент IV подают вверх колонны, нисходящим потоком. Абсорбирование углеводородов, из подготовленного факельного газа, производится гидроочищенной стабильной бензиновой фракцией 80-180 $C^O$, где насыщенный бензин V, по выходу с низа колонны, выводится на производство абсорбционно-газофракционирующей установки (АГФУ). Колонна снабжена: (счет по колонне снизу вверх) с 1 по 12 ступень тарелками клапанного типа FLEX-A14, диаметр секции 0,6 м.; с 13 по 30 ступень металлической насадкой GOODLOE, диаметр секции 0,4 м.

С верха колонны абсорбирования 11, по выходу, газовая фракция VI, расходом в 1121,8 кг/ч, состав которого, в % масс.: водород 6,71%; метан 29,12%; этан 15,41%; этилен 15,47%; пропан 19,34%; пропилен 13,70%; n-бутан 0,005%; бутен-1 0,0014%; ц-бутен-2 0,0001%; т-бутен-2 0,0002%; i-бутан 0,23%; i-бутилен 0,0026%; (углеводороды в составе газовой фракции, такие как, n-бутан, бутен-1, ц-бутен-2, т-бутен-2, i-бутан и i-бутилен показаны для демонстраций незначительного содержания в составе газовой фракций, в дальнейшем, эти компоненты не будут указаны в составах) поступает на прием компрессора 12, где нагнетается давление до 35 атм. С выкида компрессора 12 газовая фракция охлаждается в трубном пространстве теплообменника 9, охлаждается в трубном пространстве теплообменника 13 и доохлаждается в холодильном теплообменнике 14 до температуры 20 $C^O$. Холодильный теплообменник 14 представляет собой теплообменник, который входит в состав блока дросселирования, где циркулирующим хладагентом является пропан, необходимый для создания низких температур.

Из холодильного теплообменника 14 газовая фракция поступает в эвапорационную часть колонны депропанизаций 15. Колонна депропанизации 15 представляет собой аппарат, который предназначен для выработки пропан/пропиленовой фракций и водородсодержащего газа методом ректификаций. Колонна снабжена: (счет по колонне снизу вверх) с 1 по 12 ступень тарелками клапанного типа FLEX-A16, диаметр секции 0,5 м.; с 13 по 45 ступень металлической насадкой PALL габаритом 38 мм., диаметр секции 0,3 м.

Пропан/пропиленовая фракция VIII, расходом в 250 кг/ч, состав которого, в % масс.: этан 0,13%; этилен 0,01%; пропан 72,41%; пропилен 26,36%, по выходу с низа колонны выводится на тройник смешения блока производства пропилена. Водородсодержащий газ VII, расходом в 871,8 кг/ч, состав которого, в % масс.: водород 8,63%; метан 37,47%; этан 19,79%; этилен 19,91%; пропан 4,09%; пропилен 10,09%, по выходу, с верха колонны, нагревается в межтрубном пространстве теплообменника 13 и поступает в адсорбционный аппарат водородной очистки 16 для получения водородного газа высокой чистоты IX, где чистота водорода достигает до 95-99%, который пройдя через аппарат 16, расходом в 75,3 кг/ч, выводится в водородный коллектор предприятия. В аппарате 16 применяется состав адсорбентов: цеолиты, окись алюминия и активированный уголь.

Метансодержащий газ X, не прошедший адсорбер 16, расходом в 796,5 кг/ч, состав которого, в % масс.: метан 41%; этан 21,6%; этилен 21,7%; пропан 4,4%; пропилен 11%, поступает в эвапорационную часть колонны деметанизатор 17. Колонна деметанизатор 17 представляет собой аппарат, который предназначен для выработки метана требуемой чистоты XI, и этансодержащего газа XII методом ректификаций. По моделированию представленная колонна является второстепенным оборудованием, которая может быть заменена на мембранное оборудование или вовсе убрана из схемы. Поэтому задаем степень разделения до 100%. Полученный метан XI с верха колонны, по выходу, расходом до 326,6 кг/ч выводится в заводской газовый коллектор.

Этансодержащий газ XII, расходом в 469,9 кг/ч, состав которого, в % масс.: этан 36,7%; этилен 36,9%; пропан 7,6%; пропилен 18,7%, поступает в эвапорационную часть колонны деэтанизатор 18. Колонна деэтанизатор 18 представляет собой аппарат, который предназначен для выработки этановой фракции XIII и остаточная часть пропан-пропиленовой фракции XIV методом ректификаций. По моделированию представленная колонна является второстепенным оборудованием, которая может быть заменена на мембранное оборудование или вовсе убрана из схемы. Поэтому задаем степень разделения до 100%. Полученная этановая фракция XIII с верха колонны, по выходу, выводится в заводской этановый коллектор, расходом до 346,2 кг/ч. Остаточная часть пропан-пропиленовой фракций XIV, расходом в 123,7 кг/ч, состав которого, в % масс.: пропан 28,6%; пропилен 71,1%, этан-этилена до 1%, выводится на блок производства пропилена.

Пропан/пропиленовая фракция VIII, остаточная часть пропан-пропиленовой фракций XIV и базовая подача пропан/пропиленовой фракции с предприятия XV поступают в тройник смешения, общим расходом в 10373 кг/ч, состав которого, в % масс.: этан 0,003%; этилен 0,0004%; пропан 40,64%; пропилен 59,32%. После смешения и компримирования (компрессор на схеме не указан) до 25 атм., газовая смесь охлаждается до 50 $C^O$ в аппарате воздушного охлаждения 19. Из аппарата 19 газовая смесь поступает в эвапорационную часть колонны депропенизатора 20,21 которая предназначена для разделения пропан/пропиленовой фракций на отдельные компоненты, а именно пропан и пропилен методом ректификации. Колонны депропенизации 20 и 21 являются совмещенными колоннами и снабжены: колонна 20 - с 1 по 12 ступень тарелками клапанного типа FLEX-T14, диаметр секции 2,8 м., а с 13 по 45 ступеней металлической насадкой PALL габаритом 38 мм., диаметр секции 2,6 м.; колонна 21 - с 1 по 23 ступень тарелками клапанного типа FLEX-AO, диаметр секции 2,8 м., а с 24 по 45

металлической насадкой PALL габаритом 38 мм., диаметр секции 2,6 м.

С верха колонны депропенизатора 20 полученный пропилен, расходом в 6873,1 кг/ч, состав которого, в % масс.: этан 0,008%; этилен 0,002%; пропан 4,99%; пропилен 95% выводится с установки в общую пропиленовую .линию XVI. С низа колонны депропенизатора 21 полученный пропан XVII расходом в 3499,9 кг/ч, состав которого, в % масс.: пропан 94,99%; пропилен 4,92% подается в детандер 22, где снижается давление до 1,5 атм.

Из аппарата 22 пропан XVII предварительно подогревается в электронагревателе 23, нагревается в межтрубном пространстве в теплообменнике 24 и поступает в реактор дегидрирования пропана 25, который предназначен для проведения реакций дегидрирования пропана на Ni-Pt катализаторе при температуре 500-600 $C^{O}$, давлений до 1,3 атм. Для поддержания температуры и протеканий реакций в прямом направлений, в реактор подается перегретый пар с соотношением к сырью 3,5-1.

Из реактора дегидрирования 25, полученный пропилен-водородный газ XIX, расходом в 15497 кг/ч, состав которого, в % масс.: водород 0,92%; водяной пар 77,41%; пропан 1,28%; пропилен 20,36% направляется на охлаждение в трубное пространство теплообменника 24, и доохлаждается в водяном теплообменнике-паропреобразователе 26 до температуры 60 $C^{O}$, где в качестве хладагента применяется подготовленная очищенная вода XX, которая при теплообмене преобразуется в парообразное состояние с получением водяного пара XXI.

Охлажденный пропилен-водородный газ направляется в сепаратор 27, где из пропилен-водородного газа удаляется вода XXII, а остатки влаги удаляются в осушителе 28 с применением адсорбента NaX. Осушенный пропилен-водородный газ, расходом в 3497 кг/ч, состав которого, в % масс.: водород 4,08%; пропан 5,67%; пропилен 90,23% поступает в адсорбер водородной очистки 29, для получения водородного газа высокой чистоты, где чистота водорода достигает до 95-99%, который пройдя через аппарат 29, выводится в водородный коллектор предприятия расходом в 142,92 кг/ч. Пропиленовый газ, расходом 3354 кг/ч, состав которого, в % масс.: пропан 5,92%; пропилен 94,07% из аппарата 29 выводится в общую пропиленовую линию XVI.

Параметры и характеристики аппаратного, колонного и адсорбционного оборудования подбирают в зависимости от объёмов сырья, базовых параметров проведения процесса (температура, влажность, давление), чистоты получения компонентов, а также индивидуальных технологических параметров производства.

## Анализ и предложение возобновляемого источника энергий (ВИЭ)

Модель технологической установки предлагается к внедрению в цикл нефтегазоперерабатывающего предприятия, где установка будет располагаться на территории предприятия, поэтому подбор ВИЭ производится согласно географическому местоположению предприятия, учитываются метеорологические условия региона, а также целесообразность выбора ВИЭ.

В качестве нефтегазоперерабатывающего предприятия был выбран ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез», находящийся в Нижегородской области. Точку локаций предполагаемого расположения ВИЭ определяем по Google maps и Global Wind Atlas, её координаты 56.093109°, 44.195251°. Площадь размещения ВИЭ возможна до 9 км$^2$. Для выбранной локации наиболее подходящим возобновляемым источником энергий будет ветрогенерирующее оборудование.

Для корректного подбора ветрогенератора необходимо, на выбранной локации, проанализировать скорость ветра на уровнях высоты 50 и 100 метров. Согласно анализу Global Wind Atlas, на высоте 50 метров, максимальная скорость ветра составляет 5,85 м/с, а на высоте 100 метров составляет 7 м/с. Соответственно, предпочтительнее ветрогенератор высотой не менее 100 метров.

Для работы модели технологической установки требуется электроэнергий порядка 55224 КВт/ч. В качестве ветрогенерирующего оборудования предложено использовать ветрогенераторы компаний Helios Technology Co. Ltd. С учетом вышесказанного подойдет ветрогенератор Helios HF-20MW, который способен вырабатывать электроэнергий, при скорости ветра 7 м/с от 8000 до 10000 КВт/ч. Для работы установки потребуется электроэнергий порядка 55224 КВт/ч, соответственно, для функционирования установки потребуется 7 ветрогенераторов представленного типа. В представленном варианте применение 7 ветрогенераторов сосредоточено для конкретной установки.

## Основные результаты работы

Результатом работы является смоделированная технология (модель технологической установки) утилизации факельных газов для нефтегазоперерабатывающих предприятий с применением возобновляемых источников энергий, которая позволяет убрать потери ценных углеводородных компонентов в результате сжигания факельных газов. Взамен сжиганию ценных углеводородных компонентов получены различные продукты для дальнейшего их возврата в цикл общезаводского производства, а именно:

Водородный газ высокой чистоты IX (полученный общий расход в результате моделирования составил до 218,2 кг/ч) на предприятии, в настоящее время, используется по максимуму, его сжигание нецелесообразно, поскольку предназначен для многих химико-каталитических реакции на предприятии (гидроочистки, риформинга, изомеризации, в будущем - при производстве полипропилена);

Метан XI (полученный расход в результате моделирования составил до 326,6 кг/ч) и фракция этана XIII, в настоящее время, могут использоваться на предприятии для производства водорода в процессе синтез-газа Фишера-Тропша;

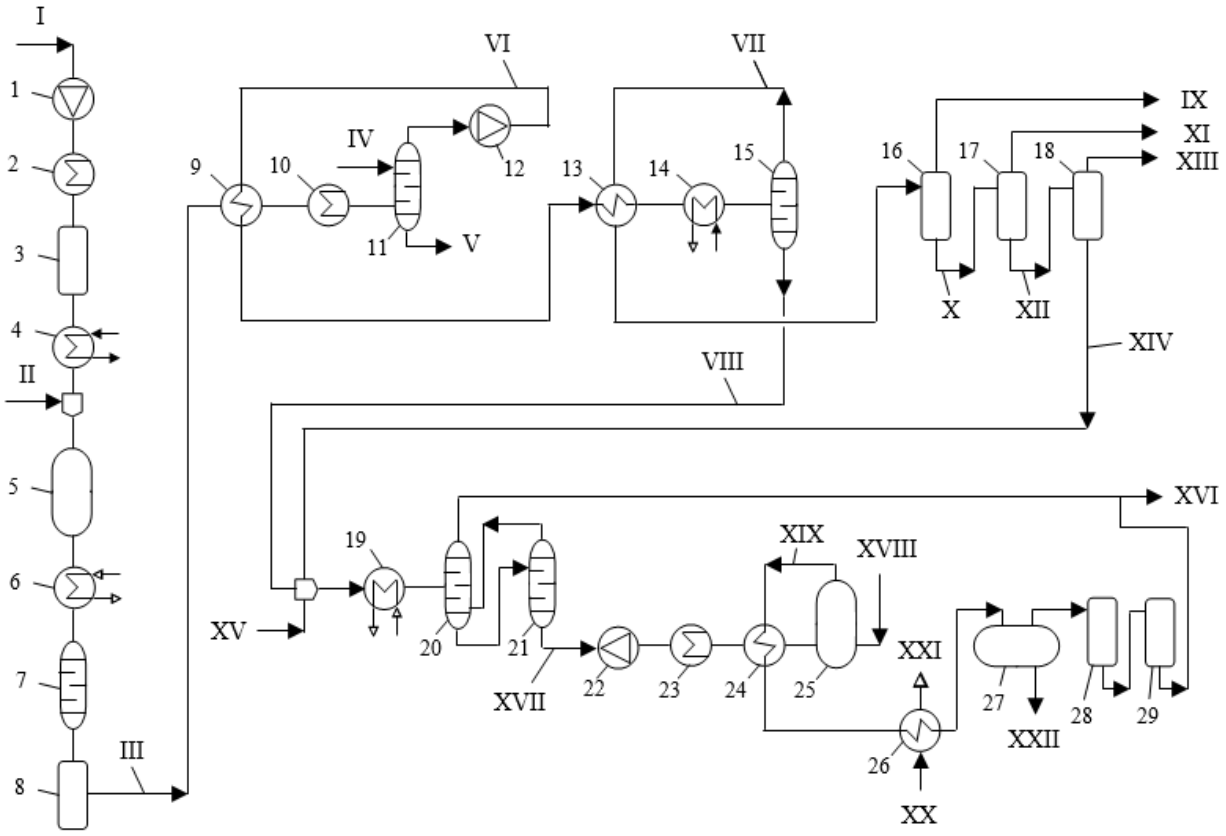


**Рис. 1 – Технологическая схема смоделированной установки**

**Fig. 1 – Technological scheme of the modeled installation**

Этановая фракция XIII (полученный расход в результате моделирования составил до 346,2 кг/ч) может реализовываться для продажи на нефтехимические отрасли для производства: хлорэтана, дихлорэтана, трихлорэтана; винилхлорида, а из него ПВХ; является сырьем для получения этилена, а из него полиэтилена, уксусной кислоты, этилового спирта, окись этилена и т.д.;

Пропилен XVI (полученный общий расход в результате моделирования составил до 10227,1 кг/ч) может реализовываться для продажи в нефтехимические отрасли для производства полипропилена, а из него, изготовление полимеров, полипропилена; получение акриловой кислоты – метилакрилата – полиметилакрилата (оргстекла), производство ПАН полиакрилонитрила (нитрон). Предприятием ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегородне- фтеоргсинтез» планируется внедрить производство полипропилена, где основным сырьем является пропилен.

Насыщенный бензин V выводиться на производство абсорбционно-газофракционирующей установки (АГФУ), которая предназначена для получения пропан-пропиленовой фракций, бутан-бутиленовой фракций, а также бензины фракции НК-85 $C^{O}$ и 85-180 $C^{O}$. Бензиновые фракции НК-85 $C^{O}$ и 85-180 $C^{O}$ являются сырьем для химико-технологических процессов на отдельных установках предприятия.

Стоит отметить, что компоненты $C_5$ + и $C_6$ сохраняются в бензиновой фракции НК-85 $C^{O}$, но также, в меньшей степени, во фракции 85-180 $C^{O}$.

Насыщенный раствор моноэтаноламина (МЭА), с низа колонны абсорбирования 7, выводится на регенерацию МЭА, где после очистки возвращается в цикл производства.

## Влияние сжигания факельных газов на экологию локального, регионального и мирового уровня

По данным усредненного состава производимых факельных газов одним предприятием, в таблице 1, были произведены расчеты по выбросам парниковых газов в атмосферу от сжигания факельных газов на факельных установках. Полученные расчетные данные, (в расчетах рассматривается только полное сжигание компонентов, подаваемые на факельные установки) представленные в таблице 2, говорят о том, что при ежегодном сжигании на факельных установках 23299,2 тонны некондиционных факельных газов будет образовываться и сбрасываться в атмосферу: 54119 тонн $CO_2$; 26908 тонн $H_2O$; 107 тонн $SO_2$. Суммарная годовая нагрузка на атмосферу от парниковых газов составит 81134 тонны [15].

Для лучшего понимания воздействия выбросов парниковых газов на атмосферу от предприятия, в расчетах, будет принят эквивалент автомобилей. В год, в среднем, 1000 автомобилей производят выбросы порядка 4000 тонн парниковых газов – это означает, что суммарная годовая нагрузка на атмосферу от сжигания некондиционных газов равна

81134 тонн и эквивалентна эксплуатаций 20283 автомобилей в год [15].

**Таблица 2 – Выбросы парниковых газов в атмосферу от сжигания факельных газов**

**Table 2 – Greenhouse gas emissions to the atmosphere from flare gas combustion**

| Сжигание компонентов | Выбросы парниковых газов, тонн/год | | |
|---|---|---|---|
| | $CO_2$ | $SO_2$ | $H_2O$ |
| водород | - | - | 5 126 |
| метан | 7 048 | - | 5 766 |
| этан | 4 520 | - | 2 774 |
| этилен | 4 631 | - | 1 894 |
| ,пропан | 9 247 | - | 5 044 |
| пропилен | 6 131 | - | 2 508 |
| н-бутан | 1 987 | - | 1 016 |
| бутен-1 | 86 | - | 35 |
| ц-бутен-2 | 86 | - | 35 |
| т-бутен-2 | 86 | - | 35 |
| і-бутан | 3 601 | - | 1 841 |
| изобутилен | 129 | - | 53 |
| n-пентан | 417 | - | 205 |
| і-пентан | 583 | - | 286 |
| $C_5$+ $C_6$+ | 544 | - | 260 |
| $CO_2$ | 3 085 | - | - |
| CO | 11 940 | - | - |
| $H_2S$ | - | 107 | 30 |
| Итого | 54 119 | 107 | 26 908 |

Рассматриваемое предприятие, которое производит выбросы парниковых газов в атмосферу от сжигания некондиционных факельных газов, находится вблизи города Кстово, Нижегородской области. Экологическая нагрузка локального уровня подразумевает выбросы парниковых газов, в результате сжигания некондиционных факельных газов, которые могут быть направлены или распространены, в результате воздействия ветра любой силы, на какой-либо близлежащий населенный пункт, в радиусе 5 километров от предприятия. В качестве близлежащего населенного пункта был взят город Кстово. В Кстово зарегистрировано население около 60 000 человек. Задаем условие, что на каждого второго человека в Кстово приходится 1 автомобиль (2 взрослых человека = 1 автомобиль). Это означает, что в Кстово зарегистрировано 30000 автомобилей. В результате сжигания некондиционных факельных газов, одно нефтегазоперерабатывающее предприятие, за год, способно производить выбросы парниковых газов в атмосферу эквивалентом 20283 автомобилей. Это эквивалент равен 67,6% от всех автомобилей, эксплуатируемых в городе Кстово [15], что является результатом экологической нагрузки на атмосферу территориального уровня.

Экологическая нагрузка регионального уровня подразумевает выбросы парниковых газов, производимые одним предприятием в результате сжигания некондиционных факельных газов, где расположение предприятия находится в границах какого-либо региона. В качестве области была взята Нижегородская область. Согласно данным Нижегородстата, за 2021 год, в Нижегородской области зарегистрировано порядка 1,6 миллиона автомобилей. В результате сжигания некондиционных факельных газов, одно нефтегазоперерабатывающее предприятие, за год, способно производить выбросы парниковых газов в атмосферу эквивалентом 20283 автомобилей. Этот эквивалент равен 1,27% от всех автомобилей, зарегистрированных в Нижегородской области [15], что является результатом экологической нагрузки на атмосферу регионального уровня.

Экологическая нагрузка мирового уровня подразумевает выбросы парниковых газов, производимые всеми нефтегазоперерабатывающими предприятиями в мире, в результате сжигания некондиционных факельных газов. В настоящее время, в мире, насчитывается 825 нефтегазоперерабатывающих предприятий. Поскольку, невозможно оценить полный масштаб скрываемых выбросов и объёмов сжигания факельных газов каждого предприятия в мире, а объёмы переработки нефтегазового сырья каждого предприятия различен, примем, что у каждого завода годовой выброс парниковых газов ниже от расчетного (81134 тонны) на 15-20%, это составит 66109 тонн. Тогда, за 1 год, 825 нефтегазоперерабатывающих заводов произведут выбросы равный 54539925 тонн парниковых газов – это будет соответствовать 13634981 автомобилям (примем как мировой эквивалент автомобилей), или соответствует 1,6% от всех неконтролируемых выбросов в мире [15], что является результатом экологической нагрузки на атмосферу мирового уровня.

Мировой эквивалент автомобилей превышает в 3,745 раза все эксплуатируемые автомобили в Финляндии (3640843 авто) или составит 26,94% по отношению ко всем зарегистрированным легковым автомобилям в России (50600000 авто) [15].

## Вывод

Полученные результаты, в ходе моделирования технологической установки, показывают нам возможность использования и применения действующих технологических процессов на нефтеперерабатывающих предприятиях нестандартно, действуя в интересах не только экономического или производственного, но и экологического потенциала. Возможен подбор своих индивидуальных оптимальных параметров, оборудования и обвязки трубопроводов – это означает, что установка может иметь свою вариативность финального исполнения. Несмотря на то, что представленные процессы в модели установки известны и применимы на практике различных производств, безусловно, потребуется построение лабораторной модели установки для установления наиболее оптимальных параметров и условий работы модели установки.

Влияние сжигания факельных газов на экологию различных уровней подтверждает тот факт, что только одно нефтегазоперерабатывающее предприятие способно наносить большую экологическую нагрузку на атмосферу, особенно, существенная нагрузка приходит на локальное местоположение

предприятия, а именно, в непосредственной близости от города Кстово. Безусловно, мировая экологическая нагрузка на атмосферу, производимая всеми нефтегазоперерабатывающими предприятиями в мире, в результате сжигания некондиционных факельных газов не является критической по сравнению со всеми выбросами парниковых газов в мире. Но, поскольку, в мире, в результате антропогенного воздействия существует множество различных источников выбросов парниковых газов в атмосферу, выбросы в атмосферу порядка 55 млн. тонн в год считаются существенными, что также подтверждает необходимость существенного снижения неконтролируемых выбросов парниковых газов в атмосферу. Применение, на практике, смоделированной технологий утилизаций факельных газов на нефтегазоперерабатывающих предприятиях с использованием возобновляемых источников энергии может поспособствовать существенному улучшению экологической обстановки. Теоретически, глубина переработки нефтегазового сырья, может достигать до 100%, а экологическая нагрузка, путем снижения сжигания некондиционных факельных газов на одном предприятий, может улучшиться: территориального уровня в 1,5 – 2 раза; регионального уровня на 1,27%. и на 1,6% в мире. Экологическая нагрузка в мире, путем снижения сжигания некондиционных факельных газов на 825 предприятиях, может улучшиться на 1,6%.

Использование действующих технологических процессов с возобновляемыми источниками энергий, а также использование передовых технологических решений на нефтегазоперерабатывающих предприятиях, в будущем, позволит расширить технологический потенциал нефтегазоперерабатывающих предприятий, действуя в интересах не только экономического или производственного, но главное – экологического потенциала. Смоделированная установка показывает, что любые производства обязаны стремится к безотходной технологии работы – это возможно. Лучший экологический эффект, при использований ветрогенерирующего оборудования, может быть достигнут путем построения ветрогенерирующего парка (введение в эксплуатацию нескольких десятков ветрогенераторов для всего предприятия).

При совершенствовании науки и технологии, установка сможет принять новые блоки в свой производственный процесс, а значит это поспособствует совершенствованию предлагаемого технологического процесса. Например, при условиях успешного развития мембранных и адсорбционных технологий в мире колонны 17 и 18 возможно заменить на мембраны или адсорберы, предназначенные для разделения метана и этана, но также, в схему, возможно дополнить аппараты адсорберы для разделения этан-этиленовой и пропан-пропиленовой фракции на отдельные компоненты.

Модель установки, прежде всего, отражает возможность практического применения. Перед практическим проектированием и внедрением установки, безусловно, потребуется проектное моделирование установки, а также построение экспериментальной установки, поскольку установка может моделироваться под нужды и практический потенциал нефтехимических и нефтегазоперерабатывающих предприятий. Например, если, на предприятий, имеются блоки производства и разделения метана, а также этановой и пропановой фракции, целесообразно перенаправлять сырьевые потоки X и XII на данные блоки, тогда достаточно оставить аппарат 16 на схеме. При необходимости, в состав схемы, возможно включение дополнительной ректификационной колонны, где сырьем будет являться этановая фракция XIII с целью получения этана и этилена методом ректификаций.

Дальнейшее направление развития предложенной модели установки можно определить, как расширение возможностей установки, например, добавить в качестве сырья факельную газовую некондицию с нефтехимических производств – это позволит нивелировать сжигание некондиционных факельных газов на нефтехимических предприятиях.

Моделирование показывает, что производство ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» имеет все возможности по сокращению выбросов аналогичного количества парниковых газов, снижение углеродного следа можно совместить с получением прибыли.

## Литература


1. Н.С.Митрофанов, V Международная научная конференция «Наука будущего» и VIII Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего — наука молодых» (Орел, Россия, Сентябрь 20-23, 2023). Сборник материалов. Орел, 2023. С. 140.
2. Н.С.Митрофанов, Научно-техническая конфе-ренция молодых ученых и специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» (Кстово, Россия, Июнь 14, 2022) Сборник материалов. Кстово, 2022. С. 26-27.
3. Tao Wang, Klaus S. Lackner and Allen Wright, Environmental Science & Technology, 45, 15, 6670-6675 (2011).
4. А.Ю. Аджиев, П.А. Пуртов, Подготовка и переработка попутного нефтяного газа в России в 2 ч., ч.1. ЭДВИ, Краснодар, 2014. 515 с.
5. В.П. Суханов, Переработка нефти, учебник для средних проф.-техн. учеб. заведении, 2-е изд., перераб. и доп. Высшая школа, Москва, 1979. 335 с.
6. А.Ю. Аджиев, П.А. Пуртов, Подготовка и переработка попутного нефтяного газа в России в 2 ч., ч.2. ЭДВИ, Краснодар, 2014. 508 с.
7. Н.С. Митрофанов, XI Международная научно-практическая конференция ученых, специалистов, преподавателей вузов, аспирантов и студентов «Экономическая безопасность России: проблемы и перспективы» (Нижний Новгород, Россия, Май 17-19, 2023). Сборник материалов. Нижний Новгород, 2023. С. 66-69.
8. И.Ш. Абдуллин, Р.Г. Ибрагимов,Н.Р. Муратов, Р.Т. Галлямов, Вестник технологического университета, 18, 9, 205-210 (2015).
9. Richard W. Baker, Industrial & Engineering Chemistry Research, 41, 6, 1393-1411 (2002).
10. Ф. Андреас, К. Гребе, Химия и технология пропилена. Химия, Ленинград 1973. С.15-23.
11. R. Mansoor, M. Tahir, Energy Fuels, 35, 5, 3675–3714 (2021).
12. Е.В. Матус, автореф. дисс. канд. хим. наук, Новосибирский ин-т катал. им. Г.К. Борескова, Новосибирск, 2007. 19 с.

13. M.E.H.Tijani, Herbert Zondag, and Yvonne Van Delft, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 10, 49, 16070–16089 (2022).
14. Пат. РФ 2558886 (2015).
15. Н.С. Митрофанов, XII Международная научно-практическая конференция ученых, специалистов, преподавателей вузов, аспирантов и студентов «Экономическая безопасность России: проблемы и перспективы» (Нижний Новгород, Россия, Май 29, 2024). Сборник материалов. Нижний Новгород, 2024. С. 68-71.

## References

1. N.S.Mitrofanov, V International Scientific Conference "Science of the Future" and VIII All-Russian Youth Scientific Forum "Science of the Future - Science of the Young" (Orel, Russia, September 20-23, 2023). Collection of materials. Orel, 2023. P. 140.
2. N.S.Mitrofanov, Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of OOO LUKOIL-Nizhegorodnefteorgsintez (Kstovo, Russia, June 14, 2022) Proceedings. Kstovo, 2022. P. 26-27.
3. Tao Wang, Klaus S. Lackner and Allen Wright, Environmental Science & Technology, 45, 15, 6670-6675 (2011).
4. A.Y. Adzhiev, P.A. Purtov, Preparation and processing of associated petroleum gas in Russia in 2 parts, part 1. EDVI, Krasnodar, 2014. 515 p.
5. V.P. Sukhanov, Oil refining, textbook for secondary vocational-technical educational institutions, 2nd ed., revision and supplement. Vysshaya Shkola, Moscow, 1979. 335 p.
6. A.Y. Adzhiev, P.A. Purtov, Preparation and processing of associated petroleum gas in Russia in 2 parts, part 2. EDVI, Krasnodar, 2014. 508 p.
7. N.S. Mitrofanov, XI International Scientific and Practical Conference of scientists, specialists, university teachers, graduate students and students "Economic Security of Russia: problems and prospects" (Nizhny Novgorod, Russia, May 17-19, 2023). Collection of materials. Nizhny Novgorod, 2023. P. 66-69.
8. I.Sh. Abdullin,R.G. Ibragimov,N.R. Muratov, R.T. Galliamov, Herald of Technological University, 18, 9, 205-210 (2015).
9. Richard W. Baker, Industrial & Engineering Chemistry Research, 41, 6, 1393-1411 (2002).
10. F. Andreas, C. Grebe, Chemistry and technology of propylene. Chemistry, Leningrad 1973. P.15-23.
11. R. Mansoor, M. Tahir, Energy Fuels, 35, 5, 3675-3714 (2021).
12. E.V. Matus, Autorref. diss. candidate of chemical sciences, G.K. Boreskov Novosibirsk Institute of Catalysis, Novosibirsk, 2007. 19 p.
13. M.E.H.Tijani, Herbert Zondag, and Yvonne Van Delft, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 10, 49, 16070-16089 (2022).
14. Pat. RF 2558886 (2015).
15. N.S. Mitrofanov, XII International Scientific and Practical Conference of scientists, specialists, university teachers, graduate students and students "Economic Security of Russia: problems and prospects" (Nizhny Novgorod, Russia, May 29, 2024). Collection of materials. Nizhny Novgorod, 2024. P. 68-71.

© **Н. С. Митрофанов –** аспирант кафедры нанотехнологий и биотехнологий, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия, nekitnext@mail.ru; **А. В. Воротынцев –** кандидат химических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторий инженерной химии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия.

© **N. S. Mitrofanov –** PhD-student of the Department of Nanotechnologies and Biotechnologies, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia, nekitnext@mail.ru; **A. V. Vorotyntsev –** PhD (Chemical Sci.), Senior Researcher at Scientific Research Laboratory of Engineering Chemistry, N.I. Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia.