

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ УСТАНОВКИ ГАЗОФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ШИРОКОЙ ФРАКЦИИ ЛЕГКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Научная статья

Воронов М.В.^{1,*}, Попов С.В.²² ORCID : 0000-0003-0533-9049;^{1,2} Самарский государственный технический университет филиал в г.Новокуйбышевск, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (maxmcqweazy[at]gmail.com)

Аннотация

Применение этановой и пропановой фракций в качестве сырья для различных процессов (пиролиз, алкилирование, полимеризация и другие) приобретает всё большую актуальность, поэтому максимизация выхода легких товарных углеводородов и улучшение качества получаемых фракций на установках газодифракционирования остается важной прикладной и исследовательской задачей. В работе рассматривается технологическая схема действующей газодифракционирующей установки, в которой реализовано ректификационное выделение этан-пропановой фракции (ЭПФ) в качестве дистиллята, а кубовым остатком колонны отводится углеводородная фракция C₃₊, которая направляется на дальнейшее расфракционирование. Анализ экспериментального состава ЭПФ, получаемой из широкой фракции легких углеводородов, показывает высокое содержание пропана в потоке ЭПФ – потери товарного пропана могут составлять до 10÷25% от его количества в сырье. Это может быть обусловлено использованием не оптимальной технологической схемы и режимов, неустойчивой работой контактных устройств, нарушением температурного профиля по высоте массообменных аппаратов. Цель исследования – поиск возможных технологических решений для минимизации содержания пропана в ЭПФ и получение товарных фракций с характеристиками, улучшающими показатели действующих технических условий. Анализ технологической схемы и получаемых показателей фракций проводили с использованием моделирующей среды UniSim Design. Вычислительным экспериментом показано, что технологическая схема и режимные параметры действующей установки не дают возможность качественно и количественно выделить из сырья потенциальное содержание пропановой фракции. Предложена измененная схема, в которой первой ректификационной колонной в качестве кубового остатка отбирается фракция C₄₊ вместо фракции C₃₊, а дистиллят направляется в новую колонну дезанитаризатор, где обеспечивается качественное разделение ЭПФ на товарные метан-этановую и пропановую фракции с характеристиками, улучшающими показатели действующих технических условий. Приводятся технологические параметры ректификационных колонн и фракционный состав потоков установки. Разработанная модель может использоваться для оптимизации технологических режимов промышленных аппаратов и проектирования новых установок.

Ключевые слова: широкая фракция легких углеводородов, газодифракционирование, ректификационная колонна, метан-этановая фракция, пропановая фракция, моделирование, UniSim Design.

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGICAL SCHEME OF THE GAS FRACTIONATION UNIT FOR WIDE FRACTION OF LIGHT HYDROCARBONS

Research article

Voronov M.V.^{1,*}, Popov S.V.²² ORCID : 0000-0003-0533-9049;^{1,2} Samara State Technical University branch in Novokuibyshevsk, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (maxmcqweazy[at]gmail.com)

Abstract

The use of ethane and propane fractions as raw materials for various processes (pyrolysis, alkylation, polymerization and others) is becoming increasingly important, so maximizing the yield of light commercial hydrocarbons and improving the quality of the fractions obtained at gas fractionation plants remains an important applied and research task. The work examines the technological scheme of the operating gas fractionation unit, in which the rectification separation of ethane-propane fraction (EPF) as a distillate is implemented, and the C₃₊ hydrocarbon fraction, which is sent for further fractionation, is removed as a cube residue of the column. The analysis of experimental composition of EPF obtained from a wide fraction of light hydrocarbons shows a high content of propane in the EPF stream – losses of marketable propane can be up to 10÷25% of its quantity in the raw material. This can be caused by the use of non-optimal technological scheme and modes, unstable operation of contact devices, violation of temperature profile along the height of mass-exchange apparatuses. The aim of the research is to search for possible technological solutions to minimize the propane content in EPF and to obtain commercial fractions with characteristics that improve the indicators of the current specifications. The analysis of the technological scheme and obtained parameters of fractions was carried out using UniSim Design modelling environment. The computational experiment shows that the technological scheme and operating parameters of the current unit do not allow to qualitatively and quantitatively isolate the potential content of propane fraction from the raw material. A modified scheme is suggested, in which

the first distillation column selects C_{4+} fraction instead of C_{3+} fraction as a cube residue, and the distillate is sent to a new deethaniser column, where qualitative separation of EPF into marketable methane-ethane and propane fractions with characteristics improving the indicators of the current technical specifications is provided. The technological parameters of rectification columns and fractional composition of the unit streams are given. The developed model can be used for optimization of technological modes of industrial apparatuses and design of new plants.

Keywords: wide light hydrocarbon fraction, gas fractionation, distillation column, methane-ethane fraction, propane fraction, modelling, UniSim Design.

Введение

Широкое развитие нефтехимии привело к бурному спросу на отдельные товарные углеводороды, которые повсеместно используются нефтехимической промышленностью. Перед многими предприятиями встал вопрос о возможности увеличения выхода товарных легких углеводородов, а также улучшения их качественных показателей. Практический интерес ректификации широкой фракции лёгких углеводородов (ШФЛУ) заключается в квалифицированном расфракционировании углеводородных фракций, от четкости разделения и качественных показателей которых зависит их дальнейшее применение в нефтехимической отрасли [1].

В последнее время заметную актуальность приобрело использование пропановой и этановой фракции в процессе пиролиза. Получаемые в результате этого процесса этилен и пропилен могут быть использованы для производства полимеров или при алкилировании различных углеводородов.

В промышленных условиях на многих предприятиях достигается недостаточно четкое разделение легких углеводородов $C_1 \div C_3$, приводящее к их взаимному присутствию во фракциях, что введет к ощутимым экономическим потерям из-за отклонения от норм технических условий товарных углеводородов [2].

Узел выделения этан-пропановой и пропановой фракции представляют наибольший интерес с точки зрения исследования возможностей оптимизации и модернизации технологической схемы, направленных на увеличение выхода товарного пропана с улучшением его качественных показателей и оценки возможности получения этановой фракции в соответствии с техническими условиями ТУ 0272-022-00151638-99.

Проблема недостаточно четкого разделения различных углеводородов часто на практике связана с несоблюдением оптимального технологического режима действующей установки, отклонением от температурного профиля по высоте колонны, неустойчивой работой внутренних контактных устройств [3], [4]. В работах [5], [6] рассматриваются методы улучшения качества расфракционирования легких углеводородов путем оптимизации существующих установок. Приведенные технологические решения увеличивают долю выхода товарного пропана, однако эти решения не являются исчерпывающими. Также некоторыми авторами рассматривается возможность оптимизации энергопотребления [7], [8] и автоматизации процесса газорасфракционирования [9], [10]. В патентах [11], [12] предлагаются различные варианты аппаратного оформления блоков выделения этановой и пропановой фракции. Альтернативные технологии разделения легких углеводородов предусматривают использование мембран [13], [14], состоящих из пористых полимерных волокон, и адсорбционное разделение газов [15], [16], основанное на поглощении определенных углеводородов специальным адсорбентом. В исследовании [17] для разделения ШФЛУ представлены результаты нетрадиционной последовательности ректификации с тепловым взаимодействием (система Петлюка), использование которой потребовало меньшее суммарное количество энергии и обеспечило снижение эффекта повторного смешивания. Оптимизация работы аппаратов разделения лёгких фракций с использованием моделирующих программных систем рассматриваются в ряде публикаций [18], [19].

Цель работы – поиск возможных технологических решений для минимизации содержания пропана в этан-пропановой фракции (ЭПФ) и получение товарных фракций с характеристиками, улучшающими показатели действующих технических условий.

Методы

Сырьё газорасфракционирующей установки – ШФЛУ, поступающая с нефте- и газоперерабатывающих предприятий. Состав ШФЛУ не постоянен, и доля легких углеводородов в нём постоянно варьируется. В зависимости от количественного состава углеводородных фракций можно номинально выделить три вида широких углеводородных фракций (ШУФ): легкая, средняя и тяжелая. Усредненный компонентный состав ШУФ представлен в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1 - Усредненный компонентный состав широкой углеводородной фракции

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.1>

Углеводоро ды	Легкая ШУФ		Средняя ШУФ		Тяжелая ШУФ	
	кг/ч	масс. доля	кг/ч	масс. доля	кг/ч	масс. доля
Метан	1275,1	0,051048	215,6	0,008619	150,0	0,006000
Этан	2557,0	0,102280	924,0	0,037697	277,0	0,011080
Пропан	9000,0	0,360001	3358,4	0,134255	1630,0	0,064000
i-Бутан	5626,4	0,225016	6249,5	0,249827	3101,8	0,124072
n-Бутан	4018,7	0,160747	7555,1	0,301875	3817,8	0,152712
i-Пентан	852,0	0,034078	2585,9	0,103373	4400,0	0,176000
n-Пентан	625,9	0,025036	3232,4	0,129216	4734,0	0,189360

Гексан	534,5	0,021379	386,1	0,015434	4772,0	0,190880
Гептан	299,4	0,011976	224,6	0,008973	954,4	0,038176
Октан	154,7	0,006189	153,53	0,006137	715,8	0,028632
Нонан	56,3	0,002250	114,9	0,004594	447,2	0,019088
Итого	25000,0	1,000000	25000,0	1,000000	25000,0	1,000000



Рисунок 1 - Диаграммы компонентных составов ШУФ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.2>

Лёгкая ШУФ содержит большое количество легких газов, таких как этан и пропан. Средняя ШУФ, в свою очередь, имеет большее количество бутан-изобутановой фракции, а в составе тяжелой ШУФ присутствует большее количество пентан-изопентановой и гексановой фракций.

На рисунке 2 показана технологическая схема типовой газодифракционной установки, разработанная в моделирующей среде Unisim Design [20]. В аппарате К-1 (ректификационная колонна) происходит фракционирование ШФЛУ на этан-пропановую фракцию (дистиллят), которая отправляется как сырье на печи пиролиза или в топливную сеть предприятия, и кубовый продукт с углеводородным составом C_{3+} , который направляется на дальнейшее расфракционирование в разрезную колонну «К-3;К-3а», где происходит выделение товарной пропановой фракции (дистиллят), а кубовый продукт с составом C_{4+} (фр.С4+) направляется в колонну К-2. В данной колонне дистиллятом отбирается сумма бутанов (i-бутан и н-бутан), дальнейшее разделение которых происходит в разрезной колонне «К-5;К-5а» с выделением товарных бутана и i-бутана. Кубовый продукт колонны К-2 в виде углеводородной фракции C_{5+} (фр.С5+) направляется в колонну К-4, где кубом колонны получается товарная гексановая фракция, а дистиллят, представленный суммой пентанов (i-пентан и н-пентан), поступает в разрезную колонну «К-6;К-6а», где происходит получение товарных н-пентана и i-пентана.

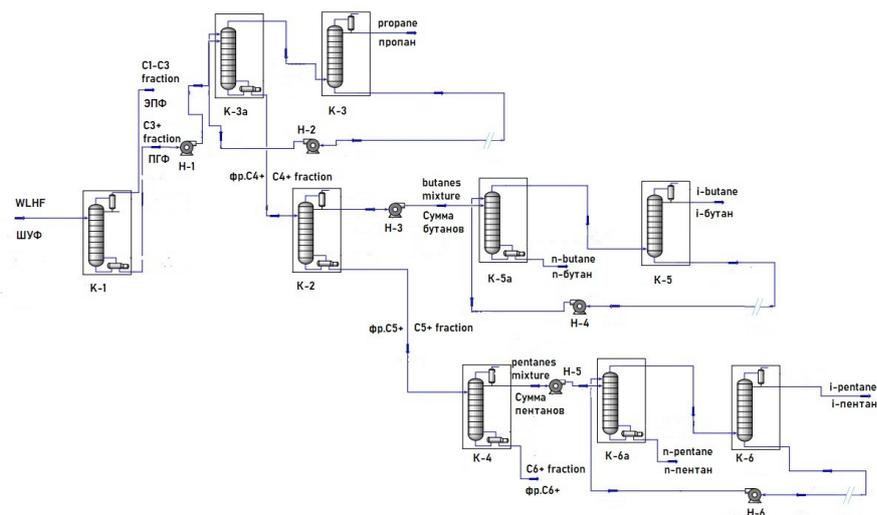


Рисунок 2 - Технологическая схема действующей газодифракционной установки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.3>

Для действующей технологической установки актуальной проблемой является частичный унос пропана в потоке ЭПФ. Потеря пропановой фракции в зависимости от углеводородного состава поступающего ШФЛУ составляет 10÷25% от его номинального количества в сырье. Данная проблема уже давно стоит перед предприятиями, однако

реализации различных технологических решений не дали существенного решения данной проблемы. Компонентный состав потоков колонны К-1 для различных ШУФ представлен в таблице 2.

Таблица 2 - Компонентный состав (доли масс.) потоков колонны К-1

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.4>

Сырьё	Углеводороды	Питание	Дистиллят	Куб
Легкая ШУФ	Метан	0,051048	0,225699	следы
	Этан	0,102280	0,452196	следы
	Пропан	0,360001	0,322105	0,371077
	i-Бутан	0,225016	следы	0,290784
	n-Бутан	0,160747	следы	0,207730
	C ₅₊	0,100908	Следы	0,130403
	Итого	1,000000	1,000000	1,000000
Средняя ШУФ	Метан	0,008619	0,126005	следы
	Этан	0,037697	0,550392	0,000050
	Пропан	0,134255	0,323603	0,120352
	i-Бутан	0,249827	следы	0,268172
	n-Бутан	0,301875	следы	0,324041
	C ₅₊	0,267727	следы	0,287385
	Итого	1,000000	1,000000	1,000000
Тяжелая ШУФ	Метан	0,006000	0,196598	следы
	Этан	0,011080	0,361674	0,000043
	Пропан	0,064000	0,441728	0,052109
	i-Бутан	0,124072	следы	0,012978
	n-Бутан	0,152712	следы	0,157519
	C ₅₊	0,642136	следы	0,662171
	Итого	1,000000	1,000000	1,000000

Результаты и обсуждение

Проведение вычислительного эксперимента, направленного на изучение возможности максимизации выхода товарного пропана, показало, что действующая ректификационная колонна К-1 способна обеспечить минимальное содержание пропана в потоке ЭПФ (0,1% масс.) при условии поддержания низких температур вверху колонны, что на практике потребует значительных и постоянных затрат на подачу хладагента для поддержания оптимальных температур. Расчётами установлено, что изменение технологических параметров колонны К-1 и направления потоков технологической схемы газофракционирующей установки может существенно улучшить качество разделения без использования методов низкотемпературной ректификации. В частности, полное испарение пропана и его вовлечение в поток ЭПФ позволяет произвести в дальнейшем разделение данной фракции на метан-этановую и пропановую фракции с помощью новой дополнительной колонны-деэтанатора Кдоп. Измененная технологическая схема установки газофракционирования ШФЛУ, реализующая сказанное, представлена на рисунке 3.

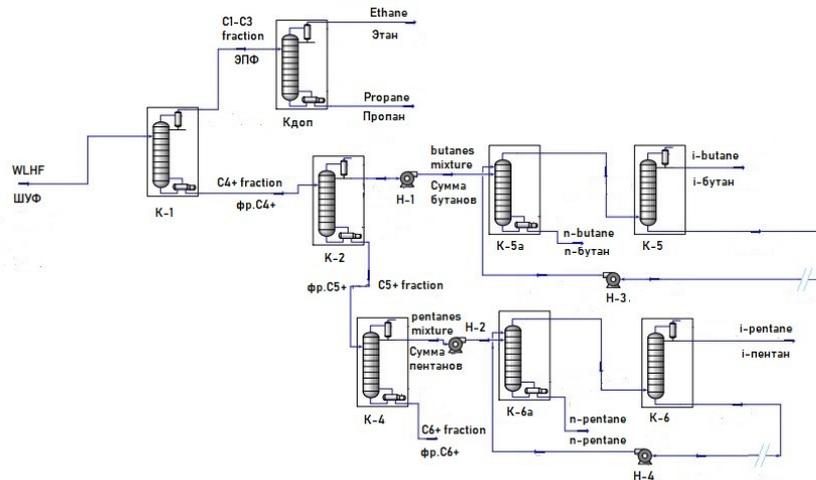


Рисунок 3 - Предлагаемая технологическая схема газофракционирующей установки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.5>

Существенное отличие предлагаемой технологической схемы от типовой заключается во включении в схему новой колонны Кдоп, изменении технологических параметров колонны К-1 для максимального вовлечения пропана в поток ЭПФ, изменении направления технологических потоков и высвобождении разрезной колонны «К-3;К-3а». Значения заводских и предлагаемых технологических параметров для колонны К-1 представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Технологические параметры колонны К-1

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.6>

Технологические параметры		Сырьё Raw		
		Легкая ШУФ	Средняя ШУФ	Тяжелая ШУФ
Температура верха, °С	заводские данные	1,3	7,2	9,2
	предлагаемые значения	26,01	31,0	33,6
Температура низа, °С	заводские данные	68,25	89,5	112,1
	предлагаемые значения	100,0	105,4	126,3
Давление, кгс/см ²	заводские данные	16,0	16,0	16,0
	предлагаемые значения	16,0	16,0	16,0

В отличие от схемы на рисунке 2 в колонне К-1 (рисунок 3) происходит выделение ЭПФ с максимальным содержанием в ней пропана, которая далее поступает на питание колонны Кдоп, где происходит выделение товарных пропановой и этановой фракций. В свою очередь, углеводородная фракция C₄₊ с куба колонны К-1 поступает в колонну К-2. Дальнейшее разделение углеводородов происходит по существующей технологической схеме (на рисунке 2 и рисунке 3 соответствующие фрагменты схем идентичны).

Схема получения товарных этановой и пропановой фракций в колонне Кдоп показана на рисунке 4, её технологические параметры и компонентный состав потоков представлены в таблице 4 и таблице 5 соответственно. Предлагаемая технологическая схема подразумевает вывод из работы разрезной колонны «К-3;К-3а» по причине того, что расчётное давление данных аппаратов не позволяет использовать их в модернизированной технологической схеме. В колонне Кдоп величина давления составляет ~ 26 кгс/м² и его снижение нецелесообразно, так как это приведет к необходимости поддержания отрицательных температур в конденсаторе верха колонны.

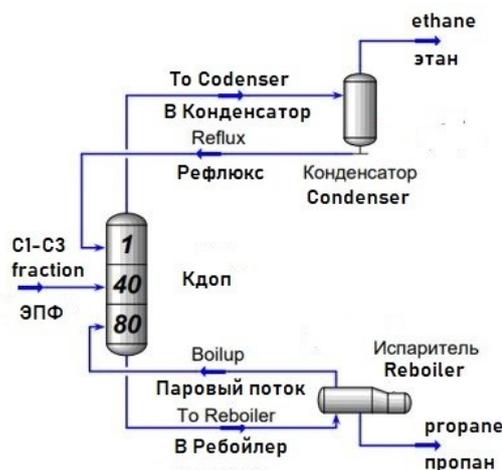


Рисунок 4 - Схема получения товарных этановой и пропановой фракций
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.7>

Таблица 4 - Технологические параметры колонны Кдоп

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.8>

Технологические параметры	Сырьё		
	Легкая ШУФ	Средняя ШУФ	Тяжелая ШУФ
Температура верха, °С	2,3	4,9	6,4
Температура низа, °С	69.8	70,1	70.2
Давление, кгс/см ²	26,0	26,0	26,0

Таблица 5 - Компонентный состав (доли масс.) потоков колонны Кдоп

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.9>

Сырьё	Углеводороды	Массовая доля		
		Питание	Дистиллят	Куб
Легкая ШУФ	Метан	0,099445	0,332950	следы
	Этан	0,199251	0,667031	0,000031
	Пропан	0,701304	следы	0,999969
	i-Бутан	следы	Следы	следы
	n-Бутан	следы	следы	следы
	Итого	1,000000	1,000000	1,000000
Средняя ШУФ	Метан	0,047736	0,186465	следы
	Этан	0,208773	0,813518	0,000682
	Пропан	0,743491	0,000017	0,999318
	i-Бутан	следы	следы	следы
	n-Бутан	следы	следы	следы
	Итого	1,000000	1,000000	1,000000
Тяжелая ШУФ	Метан	0,049339	0,246630	следы
	Этан	0,136670	0,683125	0,000010
	Пропан	0,813988	0,070245	0,999987
	i-Бутан	следы	следы	следы
	n-Бутан	следы	следы	следы
	Итого	1,000000	1,000000	1,000000

Заключение

Для типовой газодифракционной установки с ректификационными аппаратами в моделирующей среде была построена адекватная модель, с использованием которой вычислительным экспериментом показано, что на существующей технологической схеме не удастся добиться заметного снижения потерь пропана с ЭПФ. В предложенной технологической схеме изменено направление потока пропана – дистиллятом колонны К-1 отбирается фракция $C_1\text{-}C_3$, а углеводороды C_4+ отбираются кубовым продуктом и направляются на дальнейшее фракционирование в соответствии с существующим оформлением процесса. Для разделения фракции $C_1\text{-}C_3$ в схему включена дополнительная колонна-деэтанализатор Кдоп, обеспечивающая не только выделение из ШФУ номинального количества пропана, но и получение этановой и пропановой товарных фракций с улучшенными характеристиками в сравнении с соответствующими показателями нормативных документов. В предложенной схеме обеспечивается сохранение количественного и качественного выхода остальных индивидуальных товарных углеводородов.

В предлагаемой технологической схеме высвобождается разрезная колонна «К-3;К-3а», которая может быть использована для решения других задач предприятия.

Расчёты показали, что использование предлагаемой технологической схемы с колонной Кдоп позволит на практике получить дополнительную экономическую выгоду, а затраты на реконструкцию установки окупаются в течение трёх лет.

Разработанные модели схем ректификация ШФЛУ могут использоваться для оценки режимных и конструктивных параметров массообменных колонн и анализа достигаемых показателей процесса.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.10>

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.43.10>

Список литературы / References

1. Qyyum M.A. State-of-the-art-assessment of natural gas liquids recovery processes: Techno-economic evaluation, policy, implications, open issues, and the way forward / M.A. Qyyum, A. Naquash, J. Haider [et al.] // *Energy*. — 2022. — Vol. 239. — № А. — P. 121684. — DOI: [10.1016/j.energy.2021.121684](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121684).
2. Bosman D.B. Enhanced downstream processing of NGL using intensified fluid separation technologies / D.B. Bosman., Q. Li, A.A. Kiss // *Energy*. — 2024. — Vol. 296. — P. 131186. — DOI: [10.1016/j.energy.2024.131186](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131186).
3. Ткачева Т.А. Оптимизация технологического процесса установки низкотемпературной ректификации природного газа / Т.А. Ткачева, В.П. Ханин // *Научный альманах*. — 2016. — № 4-3 (18). — С. 430–433.
4. Магарил Р.З. Анализ зависимости эффективности работы колонны деэтанализации от давления в системе ректификации / Р.З. Магарил, М.С. Рогалев, А.Е. Клевцов // *Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университета*. — Тюмень, 2011. — С. 193–196.
5. Ластовецкий Е.Н. Оптимизация работы узла деэтанализации установки низкотемпературной абсорбции с целью повышения степени извлечения целевых компонентов / Е.Н. Ластовецкий // *Новые технологии – нефтегазовому региону. Материалы Международной научно-практической конференции*. — 2016. — С. 189–191.
6. Bhran A.A. Modification of deethanization plant for enhancing propane and propylene recovery and solving some operational problems. / A.A. Bhran., M.M. El-Gharbawy // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. — 2016. — Vol. 31. — P. 503–514. — DOI: [10.1016/j.jngse.2016.02.012](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.02.012).
7. Tavan Y. An increased production capacity by retrofitted industrial deethanizer column / Y. Tavan, S.H. Hosseini, A. Kargari [et al.] // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. — 2016. — Vol. 30. — P. 248–255. — DOI: [10.1016/j.jngse.2016.02.017](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.02.017).
8. Long N.V.D. Reduce Costs and Energy Consumption of Deethanizing and Depropanizing Fractionation Steps in NGL Recovery Process / N.V.D. Long, M. Lee // *Computer Aided Chemical Engineering*. — 2011. — Vol. 29. — P. 1658–1662. — DOI: [10.1016/B978-0-444-54298-4.50110-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54298-4.50110-0).
9. Камалиева К.В. Система усовершенствования управления центральной газодифракционной установкой / К.В. Камалиева, Т.С. Камалиев, А.В. Долганов // *Вестник Казанского технологического университета*. — 2016. — № 24 (19). — С. 106–108.
10. Patrascioiu C. Optimal Control System for Products Quality from a Deethanizer Column / C. Patrascioiu., N.A. Rahman., M. Popescu [et al.] // *Computer Aided Chemical Engineering*. — 2022. — Vol. 51. — P. 253–258. — DOI: [10.1016/B978-0-323-95879-0.50043-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50043-6).
11. Пат. RU145165 U1 Российская Федерация, МПК C07C7/04 B01D53/00. Установка разделения этан-пропановой фракции / Литвиненко А.В., Шеин А.О., Тютюник Г.Г., Яценко Е.В.; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский и проектный институт по переработке газа, НИПИгазпереработка. — № 2014111424/04; заявл. 25.03.2014; опубл. 10.09.2014.
12. Пат. RU2749628 C1 Российская Федерация, МПК F25J 3/02. Способ и установка выделения из природного газа целевых фракций / Имаев С.З.; заявитель и патентообладатель АЭРОГАЗ. — № 2020114715; заявл. 24.04.2020; опубл. 16.06.2021.

13. Lysova A.A. Efficient separation of methane, ethane and propane of mesoporous metal-organic frameworks / A.A. Lysova, K.A. Kovalenko, A.S. Nizovtsev [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. — 2023. — Vol. 453. — № 1. — P. 139642. — DOI: 10.1016/j.ccej.2022.139642.
14. Yan J. Highly efficient separation of C1-C3 alkanes and CO₂ in carbazole-based nanoporous organic polymers / J. Yan., S. Tong., H. Sun [et al.] // *Separation and Purification Technology*. — 2023. — Vol. 311. — P. 123205. — DOI: 10.1016/j.seppur.2023.123205.
15. Ahmed M.J. Modeling of propane separation from light hydrocarbons by adsorption on 4A molecular sieve zeolite / M.J. Ahmed, S.K. Theydan // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. — 2014. — Vol. 18. — P. 1–6. — DOI: 10.1016/j.jngse.2014.01.012.
16. Wang Y. Efficient Ethane and Propane Separation from Natural Gas Using Heterometallic Metal-Organic Frameworks with Interpenetrated Structures / Y. Wang, X. Zhao, S. Han [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. — 2024. — Vol. 16. — № 8. — P. 10468–10474. — DOI: 10.1021/acsami.3c15612.
17. Zin R.M. Energy Analysis and Remixing Effect of Thermal Coupling Petlyuk Column for Natural Gas Liquid (NGL) Fractionation Train / R.M. Zin, M.A. Abidin, M.Z. Shahrudin // *International Journal of Renewable Energy Development*. — 2021. — Vol. 10. — № 3. — P. 459–469. — DOI: 10.14710/ijred.2021.33094.
18. Rahman N.A. Simulation of the automatic control system for products quality from a deethanizer column / N.A. Rahman, P. Cristian, P. Marian // 2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). — IEEE, 2022. — P. 1–6.
19. Yao M. Energy, exergy, and economic analyses and optimization of a deethanizer tower of a petrochemical plant / M. Yao // *Chemical Product and Process Modeling*. — 2024. — Vol. 19. — № 1. — P. 13–32. — DOI: 10.1515/cppm-2023-0012.
20. Honeywell, Unisim Design User Guide. — 2013.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Qyyum M.A. State-of-the-art-assessment of natural gas liquids recovery processes: Techno-economic evaluation, policy, implications, open issues, and the way forward / M.A. Qyyum, A. Naquash, J. Haider [et al.] // *Energy*. — 2022. — Vol. 239. — № A. — P. 121684. — DOI: 10.1016/j.energy.2021.121684.
2. Bosman D.B. Enhanced downstream processing of NGL using intensified fluid separation technologies / D.B. Bosman., Q. Li, A.A. Kiss // *Energy*. — 2024. — Vol. 296. — P. 131186. — DOI: 10.1016/j.energy.2024.131186.
3. Tkacheva T.A. Optimizacija tehnologicheskogo processa ustanovki nizkotemperaturnoj rektifikacii prirodno gaza [Optimization of the technological process of the low-temperature rectification of natural gas] / T.A. Tkacheva, V.P. Hanin // *Nauchnyj al'manah [Scientific Almanac]*. — 2016. — № 4-3 (18). — P. 430–433. [in Russian]
4. Magaril R.Z. Analiz zavisimosti jeffektivnosti raboty kolonny dejetanizacii ot davlenija v sisteme rektifikacii [Analysis of de-ethanisation column efficiency dependence on the pressure in the rectification system] / R.Z. Magaril, M.S. Rogalev, A.E. Klevcov // *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvjashhennoj 55-letiju Tjumenskogo gosudarstvennogo neftegazovogo universiteta [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 55th anniversary of Tyumen State Oil and Gas University]*. — Tyumen, 2011. — P. 193–196. [in Russian]
5. Lastoveckij E.N. Optimizacija raboty uzla dejetanizacii ustanovki nizkotemperaturnoj absorbcii s cel'ju povyshenija stepeni izvlechenija celevyh komponentov [Optimization of de-ethanisation unit operation of low-temperature absorption unit in order to increase the degree of target components extraction] / E.N. Lastoveckij // *Novye tehnologii – neftegazovomu regionu. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [New technologies – oil and gas region. Lastovetsky // New technologies for oil and gas region. Materials of the International Scientific and Practical Conference]*. — 2016. — P. 189–191. [in Russian]
6. Bhran A.A. Modification of deethanization plant for enhancing propane and propylene recovery and solving some operational problems. / A.A. Bhran., M.M. El-Gharbawy // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. — 2016. — Vol. 31. — P. 503–514. — DOI: 10.1016/j.jngse.2016.02.012.
7. Tavan Y. An increased production capacity by retrofitted industrial deethanizer column / Y. Tavan, S.H. Hosseini, A. Kargari [et al.] // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. — 2016. — Vol. 30. — P. 248–255. — DOI: 10.1016/j.jngse.2016.02.017.
8. Long N.V.D. Reduce Costs and Energy Consumption of Deethanizing and Depropanizing Fractionation Steps in NGL Recovery Process / N.V.D. Long, M. Lee // *Computer Aided Chemical Engineering*. — 2011. — Vol. 29. — P. 1658–1662. — DOI: 10.1016/B978-0-444-54298-4.50110-0.
9. Kamaliev K.V. Sistema usovershenstvovaniya upravlenija central'noj gazofrakcionirujushhej ustanovki [System of control improvement of the central gas fractionation plant] / K.V. Kamaliev, T.S. Kamaliev, A.V. Dolganov // *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University]*. — 2016. — № 24 (19). — P. 106–108. [in Russian]
10. Patrascioiu C. Optimal Control System for Products Quality from a Deethanizer Column / C. Patrascioiu., N.A. Rahman., M. Popescu [et al.] // *Computer Aided Chemical Engineering*. — 2022. — Vol. 51. — P. 253–258. — DOI: 10.1016/B978-0-323-95879-0.50043-6.
11. Pat. RU145165 U1 Rossijskaja Federacija, MPK C07C7/04 B01D53/00. Ustanovka razdelenija jetan-propanovoj frakcii [Russian Federation, MPK C07C7/04 B01D53/00. Installation of ethane-propane fraction separation] / Litvinenko A.V., Shein A.O., Tjutjunik G.G., Jacenko E.V.; applicant and patentee Scientific Research and Design Institute for Gas Processing, NIPI gas processing. — № 2014111424/04; appl. 25.03.2014; publ. 10.09.2014. [in Russian]
12. Pat. RU2749628 S1 Rossijskaja Federacija, MPK F25J 3/02. Sposob i ustanovka vydelenija iz prirodno gaza celevyh frakcij [Pat. RU2749628 C1 Russian Federation, MPK F25J 3/02. Method and installation for separation of target

fractions from natural gas] / Imaev S.Z.; applicant and patentee AEROGAZ. — № 2020114715; appl. 24.04.2020; publ. 16.06.2021. [in Russian]

13. Lysova A.A. Efficient separation of methane, ethane and propane of mesoporous metal-organic frameworks / A.A. Lysova, K.A. Kovalenko, A.S. Nizovtsev [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. — 2023. — Vol. 453. — № 1. — P. 139642. — DOI: 10.1016/j.cej.2022.139642.

14. Yan J. Highly efficient separation of C1-C3 alkanes and CO2 in carbazole-based nanoporous organic polymers / J. Yan., S. Tong., H. Sun [et al.] // *Separation and Purification Technology*. — 2023. — Vol. 311. — P. 123205. — DOI: 10.1016/j.seppur.2023.123205.

15. Ahmed M.J. Modeling of propane separation from light hydrocarbons by adsorption on 4A molecular sieve zeolite / M.J. Ahmed, S.K. Theydan // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. — 2014. — Vol. 18. — P. 1–6. — DOI: 10.1016/j.jngse.2014.01.012.

16. Wang Y. Efficient Ethane and Propane Separation from Natural Gas Using Heterometallic Metal-Organic Frameworks with Interpenetrated Structures / Y. Wang, X. Zhao, S. Han [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. — 2024. — Vol. 16. — № 8. — P. 10468–10474. — DOI: 10.1021/acsami.3c15612.

17. Zin R.M. Energy Analysis and Remixing Effect of Thermal Coupling Petlyuk Column for Natural Gas Liquid (NGL) Fractionation Train / R.M. Zin, M.A. Abidin, M.Z. Shahrudin // *International Journal of Renewable Energy Development*. — 2021. — Vol. 10. — № 3. — P. 459–469. — DOI: 10.14710/ijred.2021.33094.

18. Rahman N.A. Simulation of the automatic control system for products quality from a deethanizer column / N.A. Rahman, P. Cristian, P. Marian // 2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). — IEEE, 2022. — P. 1–6.

19. Yao M. Energy, exergy, and economic analyses and optimization of a deethanizer tower of a petrochemical plant / M. Yao // *Chemical Product and Process Modeling*. — 2024. — Vol. 19. — № 1. — P. 13–32. — DOI: 10.1515/cppm-2023-0012.

20. Honeywell, Unisim Design User Guide. — 2013.