

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 546.49:622.279.8
<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-4-12-22>
EDN PMXQYL

Содержание примесей ртути в сырьевых потоках ГПЗ и их влияние на вторичные процессы переработки

С. Ю. Кондауров¹, И. С. Пикалов², Н. Д. Рябухин³, С. С. Мамонов⁴, Н. С. Фадина⁵✉

^{1, 4} ООО «Нижегороднефтегазпроект»,
Нижний Новгород, Россия

^{2, 3, 5} Центр газохимических технологий, альтернативной энергетики и экологии
ООО «Нижегороднефтегазпроект»,
Ставрополь, Россия, nelli.fadina@nngproekt.ru✉

Аннотация. В статье представлен анализ на содержание ртути в сырьевых потоках узла осушки пирогаза цеха № 2 производства этилена ООО «Ставролен». Исследовано влияние ртутьсодержащих соединений при производстве сырья для синтеза полимеров. Представлено распределение по содержанию ртути в сырье и жидких продуктах пиролиза на примерах за 2022 и 2023 гг. Изучение полученных данных показал, что наибольшее количество ртути и ртутьсодержащих соединений присутствует в тяжелых фракциях, что подчеркивает необходимость строгого контроля на этапе переработки и очистки. Выдвигается тезис о необходимости придания первостепенного значения контролю содержания ртути в сырье и продуктах на всех этапах технологического процесса. Применение системного подхода позволит не только уменьшить вероятность сбоев в работе оборудования, но и поможет избежать крупных финансовых потерь, вызванных незапланированными остановками и ремонтными работами. Описаны потенциальные риски, которые могут привести к сбоям в работе промышленных объектов. Приведен анализ по выбору оптимальной системы удаления примесей ртути. Представлено краткое сравнение между абсорбционной и адсорбционной осушкой. Утверждается, что разработка и внедрение стандартов в нефтегазовой отрасли России по контролю примесей ртути будет одним из ключевых факторов для обеспечения ее безопасности и продуктивности. Данная мера позволит снизить угрозу как для производственных объектов, так и для окружающей среды, учитывая высокую токсичность и опасность ртути и ее производных как загрязнителей.

Ключевые слова: этилен, пропилен, полимеры, содержание ртути, катализатор, реакторное оборудование, защитный слой, ртутная коррозия, широкая фракция легких углеводородов, попутный нефтяной газ

Для цитирования: Кондауров С. Ю., Пикалов И. С., Рябухин Н. Д., Мамонов С. С., Фадина Н. С. Содержание примесей ртути в сырьевых потоках ГПЗ и их влияние на вторичные процессы переработки // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2025. № 4. С. 12–22. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-4-12-22>. EDN PMXQYL.

The content of mercury impurities in GPP feed streams and their effect on secondary processing processes

S. Yu. Kondaurov¹, I. S. Pikalov², N. D. Ryabukhin³, S. S. Mamonov⁴, N. S. Fadina⁵✉

^{1, 4}Nizhegorodneftegazproekt LLC,
Nizhny Novgorod, Russia

^{2, 3, 5}Center of Gas Chemical Technologies, Alternative Energy and Ecology of the Nizhegorodneftegazproekt, LLC,
Stavropol, Russia, nelli.fadina@nngproekt.ru✉

Abstract. This article presents an analysis of the mercury content in the feed streams of the pyrogas drying unit of shop No. 2 of ethylene production by Stavrolen, LLC. The effect of mercury-containing compounds in the production of raw materials for polymer synthesis has been investigated. The distribution of mercury content in raw materials and liquid pyrolysis products is presented using the example of 2022 and 2023. The study of the obtained data showed that the largest amount of mercury and mercury-containing compounds is present in heavy fractions, which underlines the need for strict control at the stage of processing and purification. The thesis is put forward about the need to give priority to the control of mercury content in raw materials and products at all stages of the technological process. The use of a systematic approach will not only reduce the likelihood of equipment failures, but also help avoid large financial losses caused by unplanned shutdowns and repairs. The potential risks that can lead to disruptions in the operation of industrial facilities are described. An analysis is given on the choice of an optimal mercury impurity removal system. A brief comparison between absorption and adsorption drying is presented. It is argued that the development and implementation of standards in the Russian oil and gas industry for the control of mercury impurities will be one of the key factors to ensure its safety and productivity. This measure will reduce the threat to both production facilities and the environment, given the high toxicity and danger of mercury and its derivatives as pollutants.

Keywords: ethylene, propylene, polymers, mercury content, catalyst, reactor equipment, protective layer, mercury corrosion, wide fraction of light hydrocarbons, associated petroleum gas

For citation: Kondaurov S. Yu., Pikalov I. S., Ryabukhin N. D., Mamonov S. S., Fadina N. S. The content of mercury impurities in GPP feed streams and their effect on secondary processing processes. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2025;4:12-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-4-12-22>. EDN PMXQYL.

Введение

ООО «Ставролен» – нефтехимическое предприятие в составе группы «ЛУКОЙЛ», которое широко известно на российском рынке в области нефтехимии и газопереработки, стабильно входит в пятерку крупнейших работодателей своей отрасли Северо-Кавказского федерального округа, является градообразующим предприятием города Буденновска. Предприятие является лидером в РФ по производству полиэтилена, полипропилена, бензола, винилацетата и других видов нефтехимической продукции.

Производство этилена и пропилена осуществляется путем пиролиза широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ), а также прямогонного бензина, технического бутана, пропан-бутановой фракции. Этилен и пропилен на протяжении длительного времени были и продолжают оставаться

наиболее важными полупродуктами для синтеза полимеров на ООО «Ставролен».

Известно, что часть сырья закупается отдельно для производства этилена и пропилена, другая часть ШФЛУ производится на самом заводе, в частности на газоперерабатывающей установке 1 (ГПУ-1).

Действующая ГПУ-1 позволяет производить сухой отбензиненный газ (СОГ) и ШФЛУ изпутного нефтяного газа (ПНГ) для основной деятельности завода. Далее ШФЛУ направляется на производство пиролиза углеводородов нефти, очистки, компримирования и разделения пирогаза ООО «Ставролен», после которого полученные этилен и пропилен подвергаются полимеризации.

На рис. 1 представлена блок-схема производства этилена и пропилена на ООО «Ставролен».

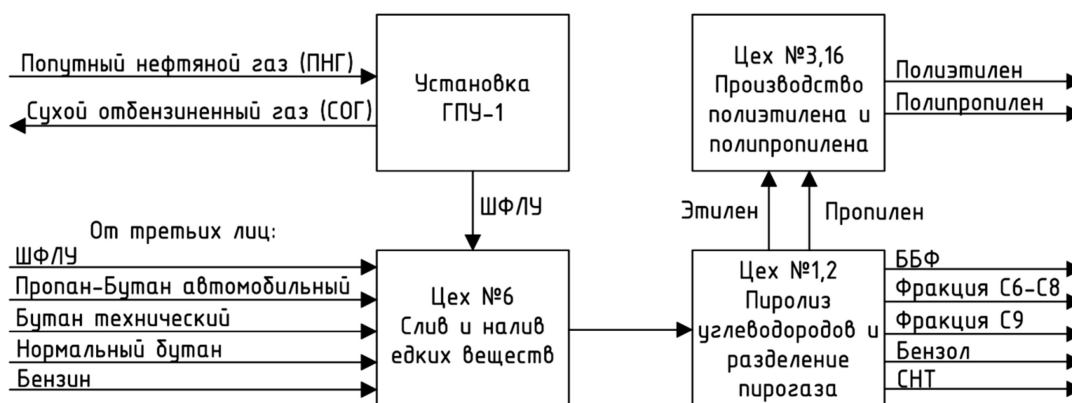


Рис. 1. Блок-схема производства этилена и пропилена на ООО «Ставролен»

Fig. 1. Block diagram of ethylene and propylene production at Stavrolen, LLC

Частично закупаемое сырье для пиролиза и последующего производства полимеров хранится в цехе № 6 «Слив и налив едких веществ». Этилен и пропилен, как сырье для синтеза полимеров, получают в следующих составных объектах подразделения «Производство этилена» ООО «Ставролен»:

- 1) цех № 1 «Пиролиз углеводородов нефти»;
- 2) цех № 2 «Разделение пирогаза и получение бензола».

Ключевой задачей в области синтеза полимеров является оптимизация выхода продукции на единицу массы катализатора. В связи с этим особое внимание уделяется очистке сырья, поступающего в реакторы, от примесей, способных вызывать дезактивацию катализаторов, а также постоянному мониторингу уровня этих примесей в очищенном сырье.

Часть примесей (следов ртути, серосодержащих соединений, диоксида углерода и органических загрязнителей) в этилене и пропилене содержится в исходном сырье, другая часть получается в результате побочных реакций в производственных процессах.

Согласно действующей технической документации, поступающие из цеха № 2 этилен и пропилен перед полимеризацией подвергаются очистке от серосодержащих соединений, ацетилен, диеновых соединений, метанола, окиси и двуокиси углерода, кислорода и влаги. Требования лицензиаров процессов полимеризации по остаточному содержанию вышеперечисленных соединений в пропилене и этилене приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Требования по содержанию в этилене и пропилене примесей после прохождения стадии очистки

Requirements for the content of impurities in ethylene and propylene after passing the purification stage

Наименование потока	Допустимое содержание примеси, не более							
	сера, мг/м ³ масс.	CH ₃ OH, % об.	HC ≡ CH, % об.	O ₂ , % об.	H ₂ O, % об.	CO, % об.	CO ₂ , % об.	диеновые соединения, % об.
Этилен	1,0	0,001	0,001	0,0002	0,001	0,0005	0,001	0,0005
Пропилен	1,0	—	0,001	—	0,0005	—	—	0,001

Как видно из табл. 1, для сырья процессов полимеризации предусматривается очистка только от типичных гетерогенных примесей, однако очистка от следов ртути, наличие которых может привести к потере прочности алюмосодержащего оборудования, загрязнению окружающей среды и уменьшению активности катализаторов, в рассматриваемых технологических процессах изначально не предусматривается.

Влияние ртути на катализаторы и алюминиевое оборудование в процессах полимеризации

Основным источником возникновения ртутьсо-

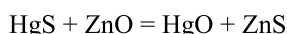
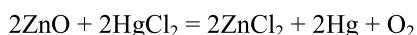
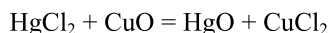
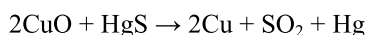
держащих соединений в виде каталитических ядов является поставляемое на ООО «Ставролен» сырье.

Ртуть может присутствовать в углеводородах в различных формах [1]:

- элементарной (Hg): встречается наиболее часто, обладает высокой растворимостью в углеводородах;
- ионной (HgS, HgCl₂): обладает высокой растворимостью в воде и низкой в углеводородах;
- органической (например, в форме диметилртути (CH₃)₂Hg): часто встречается в тяжелых фракциях газового конденсата, растворима в углеводородах;

– частиц, т. е. ртути, адсорбировавшейся на нерастворимых частицах, например, частицах ржавчины: эта ртуть нерастворима и отделяется обычной фильтрацией.

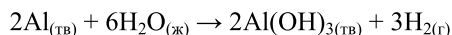
Если ртуть находится в ионном соединении (например, в виде хлорида или сульфида ртути), то при высоких температурах реакция с оксидами металлов пойдет с выпадением ртути в осадок и образованием побочных серо/хлорсодержащих продуктов, например:



В ходе химических реакций хлоридов и сульфидов ртути с оксидами металлов ситуация усугубится таким образом, что в результате полученная элементарная ртуть способна разъедать некоторые сплавы металлов, в частности из алюминия.

Согласно электрохимическому ряду напряжений металлов ртуть является металлом с низкой активностью, поэтому реакция, например, с оксидом алюминия, в чистом виде не пойдет благодаря прочной оксидной пленке.

Если на алюминии поврежден оксидный слой, то ртуть образует с ним амальгаму (сплав металла со ртутью). Свежий алюминий с амальгамой на его поверхности бурно реагирует с влагой рабочей среды:



В результате данной реакции алюминий превращается в белые хлопья метагидроксида алюминия, который образуется до тех пор, пока не закончится весь алюминий или вся ртуть.

Кроме того, соединения ртути, концентрирующиеся в углеводородных жидкостях, представляют опасность для окружающей среды и работников из-за потенциальной проблемы безопасности труда и охраны здоровья.

Можно выделить две категории экологических проблем, связанных с ртутью и ее соединениями:

1) прямое воздействия на здоровье людей вследствие вдыхания паров или соединений ртути, вызывающих необратимые повреждения жизненно важных органов у человека;

2) необходимость специализированной утилизации загрязненных ртутью материалов и оборудования.

Содержанию ртути и ртутьсодержащих соединений необходимо уделять особое внимание, поскольку из-за высокой растворимости в углеводородах они являются сильными ядами для катализаторов полимеризации, активность которых снижается за счет отравления активных центров и уменьшения молекулярной массы образующегося полимера в связи с преждевременным обрывом цепи.

В свою очередь, если снижение активности катализатора за счет отравления ядами можно предот-

вратить с помощью увеличения расхода (концентрации) катализатора, то последствия раннего обрыва цепи и образование олигомеров с более низкой температурой размягчения и плавления практически невозможно устранить путем изменения технологических параметров.

Основным негативным последствием раннего обрыва цепи является аморфизация частиц полимера, их повышенная адгезия друг к другу и поверхностям за счет более низкой, чем у полимера, температуры размягчения и плавления.

Все эти явления приводят к налипанию частиц олигомеров на внутренние поверхности аппаратов и трубопроводов, образованию агломератов.

Исходя из вышеперечисленного, содержание и влияние ртути и ртутьсодержащих соединений весьма важно учитывать при производстве этилена и пропилена, которые служат сырьем для синтеза полимеров. Это связано не только с риском отравления катализаторов полимеризации, но и с возможным использованием в технологической цепочке оборудования из алюминиевых сплавов, которые могут стать хрупкими из-за амальгамирования, а также коррозионных и структурных изменений, что способствует растрескиванию и последующей аварии.

За рубежом осознание значимости проблемы по определению ртути и ртутьсодержащих соединений стало очевидным после остановки на 14 месяцев первой очереди крупного завода по сжижению природного газа в Скинде (Алжир) в декабре 1973 г. Выяснилось, что четыре из девяти алюминиевых теплообменников вышли из строя из-за коррозии, вызванной ртутью. На сегодняшний день установлено, что содержание ртути в добываемом природном газе колеблется от долей нанограммов до 180 000 нг/м³ (180 мкг/м³) (месторождение Гронинген (Норвегия)) [2].

Большинство отечественных стандартов и технических условий не предъявляют требований по контролю наличия ртути и ртутьсодержащих соединений в сырье и продуктах, что в свою очередь сказывается при производстве продуктов полимеризации, таких как полиэтилен и полипропилен. Требование по контролю ртути фигурирует лишь при поставках нефтепродуктов на экспорт в публикации [1] и зарубежных стандартах [3, 4], где желательной считается массовая концентрация ртути ≤ 1 ppb.

В связи с нехваткой спецификаций, стандартов и норм, которые бы регламентировали требования по содержанию ртути и ртутьсодержащих соединений, отсутствуют четкие разграничения и, как следствие, точные сведения по их допустимому содержанию.

В научно-технической литературе [5–8] фигурирует, что для удовлетворения коммерческих спецификаций и предотвращения эксплуатационных проблем, в частности повреждений пластинчатых теплообменников из сплавов алюминия, содержание ртути в газе, подаваемом на сжижение, должно быть

не более 10 нг/м³. Аналогичное содержание ртути и ртутьсодержащих соединений в очищенном газе встречается и в рекомендациях от лицензиара технологических установок полимеризации этилена и пропилена.

Исследование содержания ртути в сырьевых потоках и продуктах пиролиза

В рамках профилактических мер по недопущению ранее описанных негативных ситуаций у предприятия ООО «Ставролен» возникла потребность

в проведении анализа на содержание ртути и ртутьсодержащих соединений в сырьевых потоках и жидких продуктах пиролиза.

В табл. 2 приведены результаты анализа на содержание ртути и ртутьсодержащих соединений в сырье и жидких продуктах пиролиза за 2022–2023 гг. Под «средним» содержанием ртути и ртутьсодержащих соединений подразумевается среднее арифметическое значение на базе исследуемого массива данных за весь год.

Таблица 2

Table 2

Результаты анализа по содержанию ртути и ртутьсодержащих соединений в сырье и жидких продуктах пиролиза за 2022–2023 год

Analysis results on the content of mercury and mercury-containing compounds in raw materials and liquid pyrolysis products for 2022–2023

Наименование потока	Содержание ртути и ртутьсодержащих соединений, нг/м ³					
	2022 год			2023 год		
	среднее	минимальное	максимальное	среднее	минимальное	максимальное
Сырье производства пиролиза						
ШФЛУ	134,79	61,3	241,3	100,47	40,8	155,4
ПНГ*	51,98	32,9	82,7	59,03	26,7	183,5
Пропан-бутан автомобильный	115,4	92,8	153,2	119,31	86,8	190,3
Пропан технический	410	399	421	98,3	98,3	98,3
Пропан автомобильный	–	–	–	135,7	135,7	135,7
Бутан технический	138,74	76,8	209,8	106,5	106,5	106,5
Нормальный бутан	179,27	157	217,5	99	86,5	111,5
Углеводородное сырье (н. к. 35–180 °С), в т. ч.						
российский поставщик № 1	216,59	93,08	358	180,43	28,64	658,72
российский поставщик № 2	–	–	–	732,2	350	1 400
российский поставщик № 3	234,32	68,3	402,97	149,58	27,32	280,03
Бензин газовый стабильный (БГС), в т. ч.						
российский поставщик № 4	176	35	798	140	140	140
российский поставщик № 5	65,33	35	84	–	–	–
российский поставщик № 6	109	42	399	52,5	35	77
российский поставщик № 7	30,33	21	56	38,5	21	98
российский поставщик № 8	72,63	35	126	131,44	21	308
российский поставщик № 9	239,27	21	1820	87,5	21	378
российский поставщик № 10	96,83	21	350	72,92	14	203
российский поставщик № 11	53	14	126	97,22	35	308
Жидкие продукты пиролиза						
Этилен до блока очистки	78,89	39	175	52	51	53
Пропилен после блока очистки	46,3	46,3	46,3	–	–	–
Рецикловый газ	40,05	39	41,1	–	–	–
Фракции (н. к. 35–230 °С и н. к. 35–270 °С)	274,74	125,4	706,8	–	–	–
Фракция C ₅	312,21	28,56	1 178,1	168,50	42,84	378,42
Фракция C ₆ –C ₈ до гидрирования	138,4	77,85	268,15	119,37	60,55	224,9
Фракция C ₆ –C ₈ после гидрирования	95,15	34,6	250,85	51,04	8,65	121,1
Фракция C ₉	756,95	309,4	1 719,9	789,88	218,4	2 029,3

* Данные по содержанию ртути в ПНГ приводятся в качестве справочной информации, поскольку она используется, как сырье для производства ШФЛУ на ГПУ-1.

На основании результатов анализа на содержание ртути и ртутьсодержащих соединений в сырье и жидких продуктах пиролиза за 2022–2023 гг., приведенных в табл. 2, можно сделать вывод, что граничное максимальное значение концентрации ртути свойственно жидким продуктам пиролиза с наибольшей молекулярной массой по сравнению с сырьевыми потоками.

Таким образом, путем сопоставления результатов вышеупомянутого анализа можно заключить,

что чем тяжелее продукт, тем выше концентрация ртути и ртутьсодержащих соединений в них.

Содержание ртути и ртутьсодержащих соединений в различных углеводородах требует детального анализа и осознания потенциальных рисков, связанных с их присутствием.

На рис. 2 представлен график среднего содержания ртути и ртутьсодержащих соединений в сырье пиролиза за 2022–2023 гг.

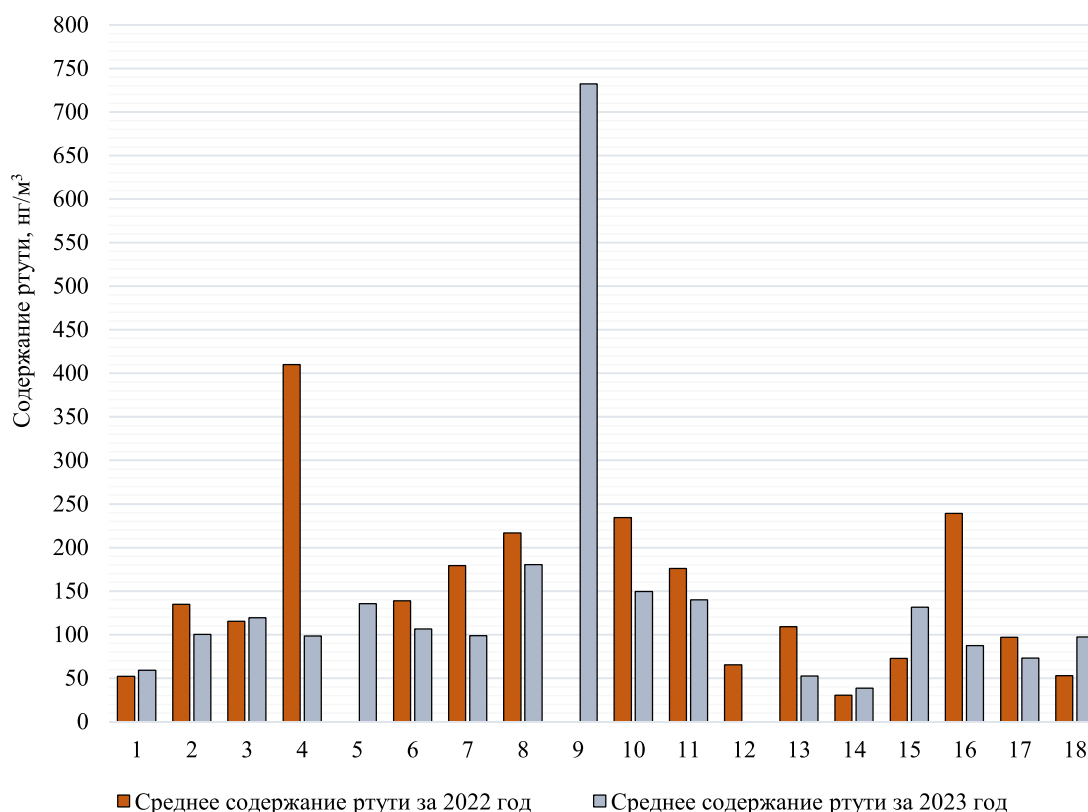


Рис. 2. Среднее содержание ртути и ртутьсодержащих соединений в сырье пиролиза за 2022–2023 гг.:

- 1 – ПНГ; 2 – ШФЛУ; 3 – пропан-бутан автомобильный; 4 – пропан технический;
 5 – пропан автомобильный; 6 – бутан технический; 7 – нормальный бутан.
 Углеводородное сырье (н. к. 35–180 °C): 8 – российский поставщик № 1;
 9 – российский поставщик № 2; 10 – российский поставщик № 3.
 Бензин газовый стабильный: 11 – российский поставщик № 4; 12 – российский поставщик № 5;
 13 – российский поставщик № 6; 14 – российский поставщик № 7; 15 – российский поставщик № 8;
 16 – российский поставщик № 9; 17 – российский поставщик № 10; 18 – российский поставщик № 11

Fig. 2. Average content of mercury and mercury-containing compounds in pyrolysis raw materials for 2022–2023:

- 1 – APG; 2 – CFLU; 3 – propane-butane automotive; 4 – propane technical;
 5 – propane automotive; 6 – butane technical; 7 – normal butane.
 Hydrocarbon raw materials (n.c. 35–180 °C): 8 – Russian supplier No. 1;
 9 – Russian supplier No. 2; 10 – Russian supplier No. 3.
 Stable gas gasoline: 11 – Russian supplier No. 4; 12 – Russian supplier No. 5;
 13 – Russian supplier No. 6; 14 – Russian supplier No. 7; 15 – Russian supplier No. 8;
 16 – Russian supplier No. 9; 17 – Russian supplier No. 10; 18 – Russian supplier No. 11

Из графика рис. 2 следует, что наиболее значительное содержание ртути и ртутьсодержащих соединений фигурирует в углеводородном сырье

(н. к. 35–180 °C), что подчеркивает необходимость строгого контроля на этапе переработки и очистки. Согласно полученным данным в табл. 2, эталон-

ным сырьем пиролиза следует считать ПНГ, поскольку в нем содержание ртути и ртутьсодержащих соединений не превышает среднее гармоническое значение (94,07 нг/м³).

На рис. 3 представлен график среднего содержания ртути и ртутьсодержащих соединений в жидких продуктах пиролиза за 2022–2023 гг.

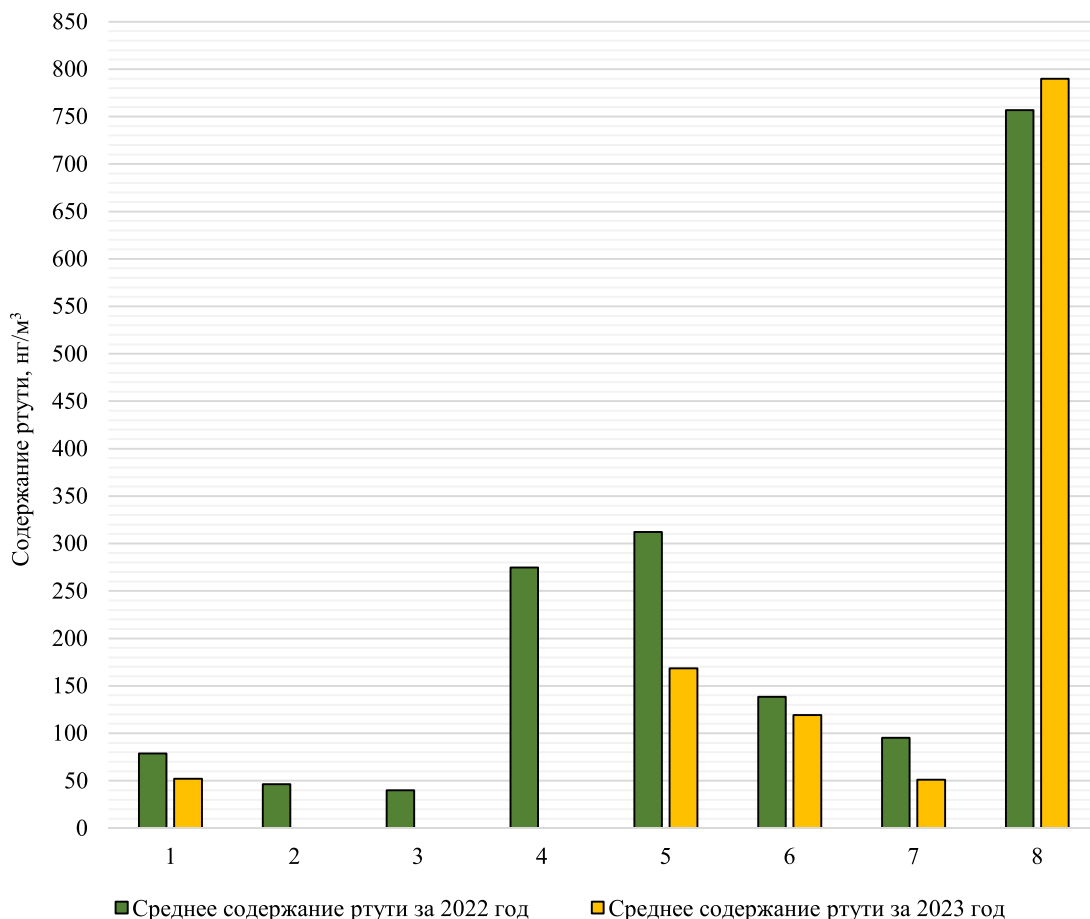


Рис. 3. Среднее содержание ртути и ртутьсодержащих соединений в жидких продуктах пиролиза за 2022–2023 гг.:

1 – этилен до блока очистки; 2 – пропилен после блока очистки; 3 – рецикловый газ;
4 – жидкие продукты пиролиза; 5 – фракция C₅; 6 – фракция C₆–C₈ до гидрирования;
7 – фракция C₆–C₈ после гидрирования; 8 – фракции C₉

Fig. 3. Average content of mercury and mercury-containing compounds in liquid pyrolysis products for 2022–2023:

1 – ethylene before the purification unit; 2 – propylene after the purification unit; 3 – recycle gas;
4 – liquid pyrolysis products; 5 – fraction C₅; 6 – fraction C₆–C₈ before hydrogenation;
7 – fraction C₆–C₈ after hydrogenation; 8 – fractions C₉

Из графика рис. 3 следует, что наиболее значительное содержание ртути и ртутьсодержащих соединений фигурирует во фракциях C₅ и C₉, что подчеркивает необходимость строгого контроля на этапе переработки и очистки. Согласно полученным данным в табл. 2, эталонными продуктами пиролиза следует считать этилен, пропилен и рецикловый газ, поскольку в нем содержание ртути и ртутьсодержащих соединений не превышает среднее гармоническое значение (92,92 нг/м³).

На основании рис. 2, 3 можно сделать вывод, что ртуть и ртутьсодержащие соединения превышают критические значения и преимущественно концентрируются в жидких фракциях C₅⁺. Тяжелые жид-

кие углеводороды, как правило, обращаются на участках с использованием стального оборудования, где влияние ртути сказывается минимально, и исключаются из технологического процесса до применения оборудования, содержащего чувствительные к ртути и ее производным алюминиевые сплавы или каталитических систем. Вследствие чего целесообразно извлекать ртутьсодержащие примеси в технологической цепочке на этапе разделения этилена и пропилена от этана и пропана во избежание отравления катализатора полимеризации и эффективного финишного разделения продуктов.

Современные решения для удаления ртути в промышленных процессах

Чистота сырья, в первую очередь отсутствие примесей ртути, имеет решающее значение для обеспечения высокого качества конечного продукта. Ртуть, выступая в роли каталитического яда, нарушает целостность углеродных цепей, что неизбежно ведет к производству некондиционной продукции с забивкой оборудования. На текущий момент на производстве полиэтилена и полипропилена предпринимаются компенсационные мероприятия, такие как более частый межремонтный останов для очистки оборудования полимеризации от забивок распределительных решеток реакторов и линий выгрузки реакторного оборудования.

Помимо этого, примеси ртути и ее производные вступают в химическую реакцию с алюминием, приводя к его разрушению. В связи с этим на производстве пиролиза и установок полимеризации было ограничено использование теплообменников из материалов, содержащих алюминиевые сплавы, что в свою очередь привело к удорожанию стоимости оборудования и увеличению сроков его поставки в случае необходимости ремонта или замены.

Таким образом, обостряется необходимость в совершенствовании уже имеющихся решений по очистке сырья за счет внедрения адсорбентов для удаления ртути и ртутьсодержащих соединений перед каталитическими системами и низкотемпературным оборудованием в процессах разделения.

Для очистки ртути и ртутьсодержащих соединений из газов и жидкостей существуют как регенеративные, так и нерегенеративные процессы их удаления. Во всех процессах используется химическая активность ртути, соединения которой для

полного удаления необходимо восстанавливать до элементарной формы. Процессы, где используется хемосорбция, могут одновременно удалять и органические соединения ртути благодаря физической адсорбции.

Для выбора оптимальной системы удаления ртути требуется выполнение комплексного анализа, включающего оценку методов утилизации или регенерации адсорбента, уровней содержания ртути в обрабатываемой среде, действующих экологических стандартов и ограничений, потенциальных операционных рисков, процедур, необходимых для безопасной и эффективной работы оператора установки, а также стоимости всего жизненного цикла системы.

Согласно вышеизложенному, применительно к заводу ООО «Ставролен», в связи с заменой существующего узла гликолевой осушки на новый адсорбционный узел осушки пирогаза после нагнетания с IV на V ступень компрессора, целесообразно предусмотреть применение адсорбента не только для эффективного извлечения влаги, но и улавливания паров ртути и ртутьсодержащих соединений (в виде отдельного слоя или аппарата).

Ввиду увеличения объемов переработки сырьевых потоков и ужесточения требований заказчика по остаточному содержанию влаги с 5 до 1 ppm, предусмотрена замена существующего узла гликолевой осушки на адсорбционный, который представляет собой более гибкий и современный подход. Данная модернизация в свою очередь позволит достичь более глубокую степень осушки на увеличенных объемах переработки сырья для полимеризации с выходом более качественного продукта.

В табл. 3 приведено краткое сравнение абсорбционной и адсорбционной осушек.

Таблица 3

Table 3

Краткое сравнение абсорбционной и адсорбционной осушек
 A brief comparison between absorption and adsorption drying

№ п/п	Параметр	Абсорбционная осушка	Адсорбционная осушка
1	Принцип действия	Поглощение влаги жидким абсорбентом (гликолем)	Поглощение влаги твердым адсорбентом (цеолиты и окись алюминия)
2	Глубина осушки	Ограничена температурой точки росы по воде, обычно до -40°C . Остаточное содержание воды в газе – не более 10 мг/м^3	Позволяет достичь точку росы по воде до -100°C . Остаточное содержание воды в газе – не более 1 ppm
3	Область применения	Метод используется, где не требуется глубокая осушка газа, в частности для его подготовки к магистральному транспорту для предупреждения образования свободной воды и гидратов	Метод используется, если требуется высокая глубина осушки газа, в частности для установок низкотемпературной переработки
4	Эксплуатационные особенности	Требует постоянного контроля уровня и свойств абсорбента, более высоких рабочих температур. Наличие значительного количества динамического оборудования (насосов), которое может выйти из строя. Наличие потерь абсорбента, требующего подпитки	Работает в периодическом режиме с неподвижным слоем адсорбента, что требует использования нескольких аппаратов для непрерывной работы. Динамическое оборудование не используется. Низкие потери рабочего вещества

Таким образом, можно сделать вывод о том, что внедрение новых технологических и конструктивных решений, в частности замена существующей гликолевой осушки на адсорбционную при производстве полимеров, обеспечит следующий ряд преимуществ.

1) снижение числа оборудования и уменьшение количества вспомогательных узлов: отсутствие регенерационных колонн, меньшее число динамического и теплообменного оборудования, за счет чего производство становится компактным и гибким;

2) снижение содержания воды до следовых количеств (1 ppm и менее) и обеспечение глубокой

осушки, что позволит достичь низкой точки росы (до -70°C и ниже).

На рис. 4 представлена блок-схема с учетом замены существующего узла гликолевой осушки (обозначен пунктиром) на новый адсорбционный узел осушки пирогаза (обозначен серым цветом) после нагнетания с IV на V ступень компрессора. В составе нового адсорбционного узла осушки пирогаза (в квадрате серого цвета) предусмотрен слой адсорбента для улавливания ртути, который позволит снизить ее содержание до 10 нг/м^3 .

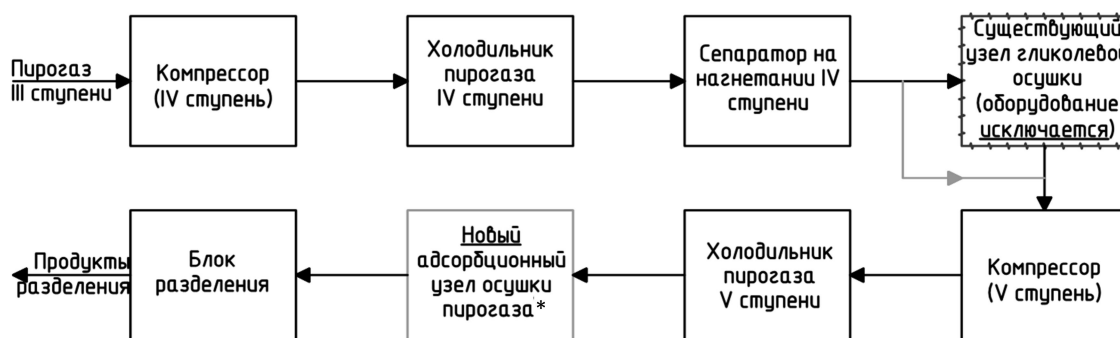


Рис. 4. Блок-схема с учетом замены существующего узла гликолевой осушки на новый адсорбционный узел осушки пирогаза

Fig. 4. Block diagram taking into account the replacement of the existing glycol drying unit with a new pyrogas drying adsorption unit

Компримированный газ с V ступени охлаждается, после чего происходит разделение пирогаза и пироконденсата. Обе фазы направляют в раз-

дельные адсорберы-осушители, откуда подают в колонны блока разделения. На рис. 5 отображена блок-схема адсорбционного узла осушки пирогаза.

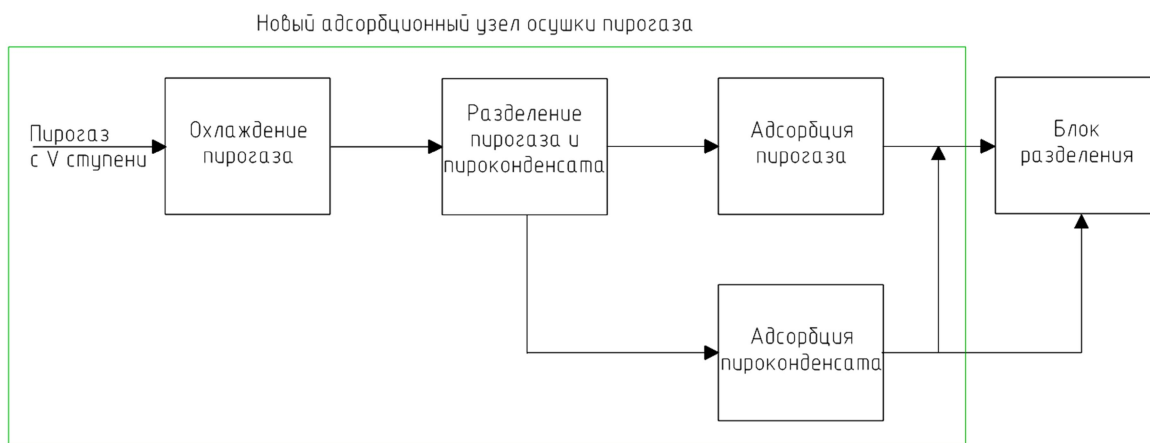


Рис. 5. Блок-схема нового адсорбционного узла осушки пирогаза

Fig. 5. Block diagram of a new adsorption unit for pyrogas drying

Благодаря данной реконструкции в дальнейшем будет исключена необходимость применения двух

отдельных аппаратов очистки в процессах полимеризации. Это технологическое решение не только

оптимизирует производственный процесс, но и существенно сократит затраты на обслуживание оборудования.

Кроме того, внедрение нового адсорбционного узла позволит значительно повысить эффективность очистки пирогаза, что в свою очередь снизит уровень выбросов вредных веществ в атмосферу и минимизирует экологический риск. Использование современных адсорбентов, способных эффективно улавливать токсины, также будет способствовать соблюдению новых стандартов охраны окружающей среды и безопасности на производстве.

Заключение

Проблеме наличия ртути необходимо уделять пристальное внимание еще на стадии выбора технологической цепочки процессов подготовки и переработки сырья и продуктов. Если примеси не будут учтены заранее, это может привести к тому, что технологические установки будут работать неэффективно или даже выйдут из строя. Данный факт повлечет за собой непредвиденные расходы и необходимость применения дополнительных компенсирующих мероприятий или специальных решений.

Список источников

1. Шевкунов С. Н. Процессы переработки газового конденсата с повышенным содержанием ртути // Актуал. проблемы добычи газа. 2018. № 1 (33). С. 207–215.
2. Morrison J. NAM recovers mercury produced with Dutch natural gas // *Oil and gas Journal*. 1972. Vol. 70. N. 16. P. 72–73.
3. ASTM D7622-20. Standard test method for total mercury in crude oil using combustion and direct cold vapor atomic absorption method with Zeeman background correction. URL: <https://catalogue.normdocs.ru/catalog/com.normdocs.astm.card.d7622-20/Standard-ASTM-D7622-20> (дата обращения: 01.11.2025).
4. ГОСТ 28726.2–2018 (ISO 6978-2:2003). Газ природный. Определение ртути. Часть 2. Подготовка пробы путем амальгамирования сплава золото/платина = Natural gas. Determination of mercury. Part 2. Sampling of mercury by amalgamation of gold/platinum alloy. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160091> (дата обращения: 01.11.2025).

В связи с потенциальным наличием ртути и ртутьсодержащих соединений в сырье и продуктах на внутреннем рынке нефтегазовой промышленности России, необходимо активно развивать отечественные стандарты и технические условия, которые бы предъявляли требования к контролю по содержанию ртути.

Таким образом, вопросы контроля содержания ртути в сырье и продуктах должны стать приоритетными на всех стадиях технологического процесса. Системный подход к этой проблеме позволит не только минимизировать риски, связанные с эксплуатацией оборудования, но и существенно снизить финансовые потери, связанные с непредвиденными остановками и ремонтами. Разработка и внедрение строгих отечественных стандартов станут залогом безопасности и эффективности работы нефтегазовой отрасли в России. Это поможет защитить не только производственные мощности, но и окружающую среду, учитывая, что ртуть и ее соединения являются опасными и чрезвычайно токсичными загрязнителями.

5. Кидни А. Дж., Парриш У. Р., Маккартни Д. Основы переработки природного газа / пер. с англ. яз. 2 изд. под ред. О. П. Лыкова, И. А. Голубевой. СПб.: Профессия, 2014. 664 с.
6. Федорова Е. Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. М.: РГУ нефти и газа, 2011. 158 с.
7. Арыстанбекова С. А., Лапина М. С., Волынский А. Б. Разработка нормативно-технической документации для газовой отрасли в химико-аналитической лаборатории «Газпром ВНИИГАЗ» // Лаборатория и производство. 2018. № 3 (3). С. 116–121.
8. Арыстанбекова С. А. Разработка ГОСТ «Природный газ. Определение ртути. Часть 2: Подготовка пробы путем амальгамирования сплава золото/платина». URL: https://www.tk-52.ru/fileadmin/f/activitiy/meetings/2017.11.30/Arystanbekova_GGP_Opredelenie_rtuti_CHast_2.pdf (дата обращения: 01.11.2025).

References

1. Shevkunov S. N. Processy pererabotki gazovogo kondensata s povyshennym soderzhaniem rtuti [Gas condensate processing processes with high mercury content]. *Aktual'nye problemy dobychi gaza*, 2018, no. 1 (33), pp. 207–215.
2. Morrison J. NAM recovers mercury produced with Dutch natural gas. *Oil and gas Journal*, 1972, vol. 70, no. 16, pp. 72–73.
3. ASTM D7622-20. Standard test method for total mercury in crude oil using combustion and direct cold vapor atomic absorption method with Zeeman background correction. Available at: <https://catalogue.normdocs.ru/catalog/com.normdocs.astm.card.d7622-20/Standard-ASTM-D7622-20> (accessed: 01.11.2025).

4. GOST 28726.2–2018 (ISO 6978-2:2003). *Gaz prirodnyj. Opredelenie rtuti. Chast' 2. Podgotovka proby putem amal'gamirovaniya splava zloto/platina = Natural gas. Determination of mercury. Part 2. Sampling of mercury by amalgamation of gold/platinum alloy*. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200160091> (accessed: 01.11.2025).
5. Kidni A. Dzh., Parrish U. R., Makkartni D. *Osnovy pererabotki prirodnogo gaza* [Fundamentals of natural gas processing] / per. s angl. yaz. 2 izd. pod red. O. P. Lykova, I. A. Golubevoj. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2014. 664 p.

6. Fedorova E. B. *Sovremennoe sostoyanie i razvitie mirovoj industrii szhizhennogo prirodnogo gaza: tekhnologii i oborudovanie* [Current state and development of the global liquefied natural gas industry: technologies and equipment]. Moscow, RGU нефти i gaza, 2011. 158 p.

7. Arystanbekova S. A., Lapina M. S., Volynskij A. B. *Razrabotka normativno-tekhnicheskoy dokumentatsii dlya gazovoj otrasli v khimiko-analiticheskoy laboratorii «Gazprom VNIIGAZ»* [Development of regulatory and technical documentation for the gas industry at the Gazprom VNII-

GAZ Chemical and Analytical Laboratory]. *Laboratoriya i proizvodstvo*, 2018, no. 3 (3), pp. 116-121.

8. Arystanbekova S. A. *Razrabotka GOST «Prirodnyy gaz. Opredelenie rtuti. Chast' 2: Podgotovka proby putem amal'gamirovaniya splava zoloto/platina»* [Development of GOST "Natural gas. Determination of mercury. Part 2: Sample preparation by amalgamation of gold/platinum alloy"]. Available at: https://www.tk-52.ru/fileadmin/f/aktivitiy/meetings/2017.11.30/Arystanbekova_GGP_Opredelenie_rtu ti_CHast_2.pdf (accessed: 01.11.2025).

Статья поступила в редакцию 14.10.2025; одобрена после рецензирования 28.11.2025; принята к публикации 03.12.2025
The article was submitted 14.10.2025; approved after reviewing 28.11.2025; accepted for publication 03.12.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Станислав Юрьевич Кондауров – кандидат технических наук; генеральный директор; ООО «Нижегороднефтегазпроект»; info@nngproekt.ru

Stanislav Yu. Kondaurov – Candidate of Technical Sciences; General Director; Nizhegorodneftegazproekt, LLC; info@nngproekt.ru

Илья Сергеевич Пикалов – кандидат технических наук; заместитель генерального директора по научно-технической деятельности; Центр газохимических технологий, альтернативной энергетики и экологии ООО «Нижегороднефтегазпроект»; Ilia.Pikalov@nngproekt.ru

Ilya S. Pikalov – Candidate of Technical Sciences; Deputy Director General for Scientific and Technical Activities; Center for Gas Chemical Technologies, Alternative Energy and Ecology of the Nizhegorodneftegazproekt, LLC; Ilia.Pikalov@nngproekt.ru

Николай Дмитриевич Рябухин – начальник технологического отдела; Центр газохимических технологий, альтернативной энергетики и экологии ООО «Нижегороднефтегазпроект»; nikolay.ryabukhin@nngproekt.ru

Nikolay D. Ryabukhin – Head of the Technology Department; Center for Gas Chemical Technologies, Alternative Energy and Ecology of the Nizhegorodneftegazproekt, LLC; nikolay.ryabukhin@nngproekt.ru

Сергей Сергеевич Мамонов – заместитель генерального директора по производству; ООО «Нижегороднефтегазпроект»; sergey.mamonov@nngproekt.ru

Sergey S. Mamonov – Deputy General Director for Production; Nizhegorodneftegazproekt, LLC; sergey.mamonov@nngproekt.ru

Нелли Сергеевна Фадина – инженер 3-й категории технологического отдела; Центр газохимических технологий, альтернативной энергетики и экологии ООО «Нижегороднефтегазпроект»; nelli.fadina@nngproekt.ru

Nelly S. Fadina – 3rd Category Engineer of Engineering Department; Center for Gas Chemical Technologies, Alternative Energy and Ecology of the Nizhegorodneftegazproekt, LLC; nelli.fadina@nngproekt.ru

