

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТОПЛИВА И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ CHEMICAL TECHNOLOGY OF FUEL AND HIGH-ENERGY SUBSTANCES

Научная статья

УДК 661.183; 66.074.31

DOI: 10.26730/1999-4125-2022-2-31-41

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИОННОЙ ОСУШКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Гафарова Элиза Багаутдиновна,
Мельников Вячеслав Борисович

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

*для корреспонденции: gafarovaeliza@mail.ru



Информация о статье

Поступила:

19 ноября 2021 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 марта 2022 г.

Принята к публикации:

29 апреля 2022 г.

Ключевые слова:

сжиженный природный газ,
СПГ, адсорбционная осушка
газов, цеолиты,
технологические схемы.

Аннотация.

В статье изложены результаты технологического расчета используемых схем с двумя и тремя адсорберами процесса осушки природного газа перед сжижением при производстве сжиженного природного газа для пяти различных адсорбентов отечественных производителей. Целью данного расчета является минимизация затрат при осушке газа и выявления максимально эффективной технологии использования свойств адсорбента и оптимальной технологической схемы данного процесса. Для каждого из этих случаев было вычислено необходимое количество адсорбента, основные размеры аппарата, обеспечивающего работу процесса, расчет расходов газа регенерации и охлаждения, тепловые затраты и так далее. По результатам расчета был проведен сравнительный анализ по основным показателям процесса и проведен дальнейший расчет при замене трехадсорберной схемы установки на двухадсорберную с использованием цеолита NaX без связующего, который также показал более высокую эффективность при использовании двухадсорберной схемы. В результате исследования было выявлено, что на сегодняшний день отечественной промышленностью разработаны и разрабатываются эффективно работающие осушители, которые позволяют достигать требуемого показателя значения точки росы по влаге газа, идущего с установки адсорбционной осушки при производстве сжиженного природного газа. Эти адсорбенты могут служить равноценной заменой зарубежным адсорбентам, используемым на многих отечественных заводах при подготовке газа к сжижению.

Для цитирования: Гафарова Э.Б., Мельников В.Б. Сравнительный анализ основных показателей процесса адсорбционной осушки при производстве сжиженного природного газа // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 2 (150). С. 31-41. doi: 10.26730/1999-4125-2022-2-31-41

Неотъемлемой технологической частью производства сжиженного природного газа (СПГ), промышленной подготовке природного газа к трубопроводному транспорту, подготовки водорода и других газов для различных процессов в нефтегазовой отрасли является адсорбционная осушка и очистка газа. Так, осушка газа применяется для предупреждения образования гидратов и газовых гидратов в трубопроводах и аппаратах технологических процессов. Гидраты и капельная влага, отлагаясь в технологических трубопроводах и аппаратах, уменьшают их сечение, что приводит к увеличению гидравлических сопротивлений и дополнительным энергетическим затратам. Особенно важно предупреждение образования твердых газовых гидратов в теплообменных аппаратах, являющиеся одним из самых металлоемких, сложных по конструкции и обслуживанию, а также дорогостоящего оборудования производства СПГ [1-5].

В промышленных процессах адсорбционной осушки газов на установках как малой, так и высокой производительности в настоящее время широко применяются такие адсорбенты, как алюмосиликаты, силикагели и молекулярные сита (цеолиты типа А и X), которые отвечают требованиям нормативных документов по содержанию влаги в газах [6].

На многих отечественных предприятиях, в том числе на заводах СПГ, в процессе адсорбционной осушки газа используются зарубежные адсорбенты, хотя их отечественное производство является в достаточной степени развитым. Российские адсорбенты имеют высокие показатели, не уступающие зарубежным аналогам, по всем основным характеристикам – активности, насыпной плотности, механической прочности, водостойкости и так далее – и способны осушать газ до требуемой по нормативным документам температуры точки росы по влаге при производстве СПГ.

Технологический процесс адсорбционной осушки газа состоит из следующих стадий: поглощение влаги из газа (адсорбция), удаление сорбированной влаги из адсорбента (регенерация) и охлаждение адсорбента [7].

Аппаратурное оформление процесса адсорбционной осушки газа может быть выполнено как по технологической схеме, включающей 2 адсорбера, так по схеме, включающей 3 адсорбера.

В данной статье представлены результаты сравнительных технологических расчетов технологических схем с двумя и тремя адсорберами с целью минимизации затрат при адсорбционной осушке газа и выявления максимально эффективного использования свойств адсорбента и оптимальной технологической схемы осушки газа.

Для сравнительных технологических расчетов схем с тремя адсорберами была использована трехадсорберная схема осушки газа, применяемая, например, на установке осушки газа «ОАО Ямал СПГ», принципиальная схема которой представлена на рис. 1 [8].

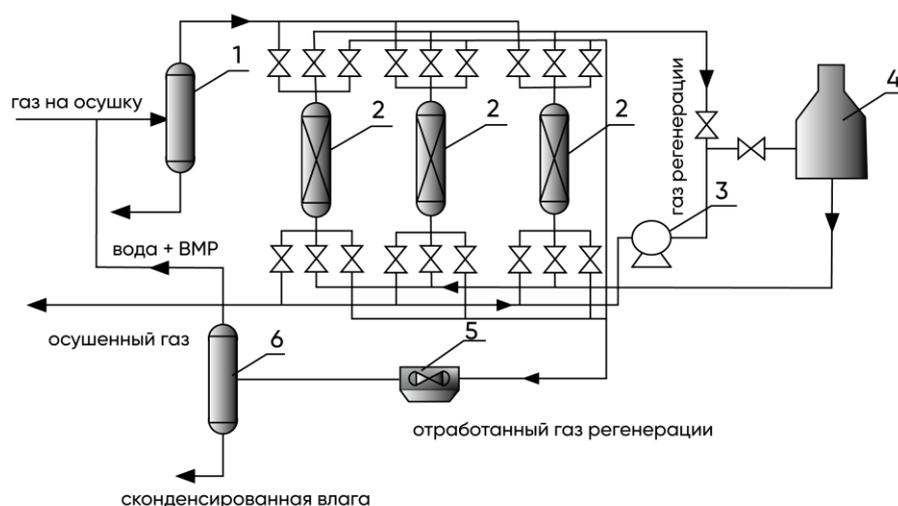


Рис. 1. Принципиальная схема осушки с тремя адсорберами

Fig. 1. Schematic diagram of drying with three adsorbers

Таблица 1. Циклограмма технологического переключения адсорберов
Table 1. Cyclogram of technological switching of adsorbers

	адсорбер 1	адсорбер 2	адсорбер 3
18 часов	адсорбция-осушка	адсорбция-осушка.	регенерация + охлаждение
18 часов	регенерация + охлаждение	адсорбция-осушка	адсорбция-осушка
18 часов	адсорбция-осушка	регенерация + охлаждение	адсорбция-осушка

Сначала поток сырьевого газа поступает во входной сепаратор 1, в котором из газа удаляются водометанольный раствор и газовый конденсат, а также механические примеси. Затем поток газа поступает в первый адсорбер. В рассматриваемой принципиальной схеме два аппарата работают в режиме (цикле) адсорбции, третий – на регенерации и охлаждении.

Газ заходит в адсорберы осушки сверху вниз, где, проходя через слой адсорбента, освобождается от влаги и приобретает требуемое значение концентрации влаги на выходе с установки.

При достижении заданной температуры точки росы по влаге адсорбер переключается на технологический цикл регенерации и охлаждения. Регенерация осуществляется потоком частью осушенного газа, предварительно подающегося компрессором в печь для нагрева до необходимой температуры. Поток осушенного и нагретого газа поступает в адсорбер на регенерацию адсорбента снизу вверх, в котором при определенных термобарических условиях осуществляется десорбирование влаги с поверхности и из пор адсорбента. Выходящий из адсорбера газ регенерации проходит через АВО, где охлаждается и поступает далее в сепаратор 6, в котором из газа отделяются продукты десорбции. Затем отсепарированный газ смешивается с потоком сырого газа и подается во входной сепаратор 1. Таким образом, технологический цикл осушки газа замыкается.

Стадия охлаждения адсорбента осуществляется потоком газа, являющегося также частью уже осушенного газа. Процесс охлаждения заканчивается при достижении температуры потока газа внизу адсорбера до значения приблизительно 50°C.

Рассмотрим технологический расчет осушки с тремя адсорберами применительно к установке «ОАО Ямал СПГ». В данном случае зададимся усредненным значением технологических циклов: стадия адсорбции осуществляется в течение 36 часов в двух аппаратах и стадии регенерации и охлаждения осуществляют по 9 часов каждая. Через каждые 18 часов происходит смена циклов и процесс сдвигается на один адсорбер. При этом технологическая циклограмма выглядит следующим образом (таблица 1).

При выполнении расчетов приняты следующие характеристики. Расход газа, поступающего на установку адсорбционной осушки, равен 627854 кг/ч, или 858780 м³/ч, что соответствует крупнотоннажному производству СПГ (5,5 млн т/год, так же как на заводе «Ямал СПГ» [8].

Примем температуру процесса адсорбции равной 20°C, давление процесса равным 7,2 МПа. Тогда плотность газа при рабочих условиях составит 56,14 кг/м³.

Требование по содержанию влаги к газу, поступающему на сжижение, составляет не более 1 ppmv, т.е. концентрация влаги в потоке осушенного газа на выходе с установки осушки должна составлять не более 0,0001% масс.

Основные характеристики рассматриваемого процесса адсорбционной осушки газа представлены в таблице 2.

В таблице 3 приведен компонентный состав газа, поступающего в процесс адсорбционной осушки газа.

В соответствии с представленными данными содержание влаги на входе в установку осушки составляет [10]:

$$W_{\text{вх}}=0,0266665 \text{ кг/м}^3$$

а на выходе с установки осушки:

$$W_{\text{вых}}=0,00005614 \text{ кг/м}^3$$

Минимальное количество влаги, которое необходимо удалить из газа в процессе его осушки, составляет:

Таблица 2. Основные характеристики процесса
Table 2. Main characteristics of the process

Расход поступающего газа, кг/ч	627854
Расход поступающего газа, м ³ /ч [Q _г]	858780
Рабочая температура, °С [T _{раб}]	20
Рабочее давление, МПа (кгс/см ²) [P _{раб}]	7,2
Температура газа на входе, °С [T ₁]	20
Температура газа на выходе, °С, [T ₂]	20
Давление процесса сжижения газа, МПа (кгс/см ²) [РСПГ]	4,5(45)
Плотность газа при нормальных условиях, кг/м ³ [ρ _н]	0,7311
Плотность газа при рабочих условиях, кг/м ³ [ρ _р]	56,14
Относительная плотность газа по воздуху	0,5634
Объемный расход газа при рабочих условиях процесса, м ³ /с [Q _{гр}]	3,107

Таблица 3. Состав газа, поступающего на установку осушки [9]
Table 3. Composition of gas supplied to the drying unit

Компонент	Концентрация, % мас.
Вода	0,0475
Метанол	0,0011
Азот	2,2466
Диоксид углерода	0,0407
Метан	97,6011
Этан	0,0320
Пропан	0,0010
и-Бутан	0,0119
н-Бутан	0,0095
н-Пентан	0,0041
н-Гексан	0,0002
Гелий	0,0043

Таблица 4. Равновесная влагоемкость метана
Table 4. Equilibrium moisture content of methane

T, °С	P, МПа	W _{равн}
-83,5	4,5	0,0746
-87,3	4	0,0719
-91,6	3,5	0,0685

Таблица 5. Характеристики цеолитсодержащих адсорбентов [12-15]
Table 5. Characteristics of zeolite-containing adsorbents

Марка	Изготовитель	Диаметр черенка, мм	Насыпная плотность, г/см ³	Механич. прочность, кг/мм ²	Динамическая емкость по парам воды, мг/см ³
NaX-БС	"Ишимбайские Сорбенты"	2,8	0,62	1,0	159
NaX	"Нижегородские Сорбенты"	3,0	0,68	1,1	123
CaA	"Ишимбайские Сорбенты"	2,9	0,68	2,8	120
NaA-БС	"Ишимбайские Сорбенты"	2,8	0,66	3,4	158
NaA	"Нижегородские Сорбенты"	3,0	0,84	2,1	136

* БС – цеолиты без связующего

$$\Delta W = 0,0266665 - 0,00005614 = 0,02661036 \text{ кг/м}^3$$

Для предотвращения образования газовых гидратов необходимо, чтобы содержание влаги в газе на выходе с установки осушки было меньше минимального равновесного содержания влаги в газовом потоке ($W_{\text{вых}} \leq W_{\text{равн}}$), значения которого при различных значениях давления представлены в таблице 4.

Таблица 6. Основные формулы технологического расчета
Table 6. Basic formulas for technological calculation

<p>Требуемая масса адсорбента G_a, кг</p> $G_a = \frac{\Delta W \cdot Q_{\Gamma}}{(A \cdot n)}$ <p>где A – динамическая емкость по парам воды, % масс.; n – количество аппаратов, одновременно работающих на стадии адсорбции.</p>
<p>Объем слоя адсорбента V_a, м³</p> $V_a = \frac{G_a}{\rho_{\text{нас}}}$
<p>Расчетный внутренний диаметр адсорбера $D_{\text{вн}}$, м</p> $D_{\text{вн}} = \left(\frac{4Q_{\Gamma p}}{\pi \cdot w_{\Gamma p}} \right)^{1/2}$ <p>где $w_{\Gamma p}$ – средняя допустимая скорость потока газа, м/с, значение которой принимаем равным 0,3 м/с; $Q_{\Gamma p}$ – расход газа в рабочих условиях, м³/с</p>
<p>Высота слоя адсорбента, H_a, м</p> $H_a = \frac{4V_a}{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}$
<p>Количество теплоты для нагрева базовой части одного аппарата Q_1, кДж/цикл</p> $Q_1 = (g_k \cdot c_k + g_u \cdot c_u + g_{ad} \cdot c_{ad}) \cdot (t_2 - t_1)$ <p>где g_k, g_u, g_{ad} – массы аппарата, изоляции и адсорбента соответственно, кг; c_k, c_u, c_{ad} – средняя удельная теплоемкость 09Г2С, изоляции и адсорбента в интервале температур ($t_1 - t_2$), кДж / (кг · °С); ($t_2 - t_1$) – разность между конечной и начальной температурами стадии регенерации; °С.</p>
<p>Количество теплоты для нагрева десорбированной влаги Q_2, кДж/цикл</p> $Q_2 = m_v \cdot c_v \cdot (t_2 - t_1)$ <p>где m_v – масса адсорбированной влаги, кг/цикл; c_v – средняя удельная теплоемкость воды при ($t_1 - t_2$), кДж / (кг · °С)</p>
<p>Количество теплоты для нагрева всей системы десорбированной влаги Q_m, кДж/цикл</p> $Q_T = Q_1 + Q_2$
<p>Количество теплоты, расходуемое на десорбцию поглощенной влаги Q_n, кДж/цикл</p> $Q_n = m_v \cdot q_{ad}$ <p>где m_v – масса адсорбированной влаги, кг/цикл.</p>
<p>Расход газа регенерации $G_{\text{рег}}$, кг/цикл</p> $G_{\text{рег}} = \frac{Q_n - Q_T}{(c_{\text{рег}} \cdot (t_1' - t_2'))}$ <p>где $c_{\text{рег}}$ – средняя удельная теплоемкость газа регенерации при температурах ($t_1' - t_2'$), кДж / (кг · °С); $t_1' - t_2'$ – разность между значениями температур газа регенерации при входе и при выходе из аппарата, °С.</p>
<p>Расход газа охлаждения $G_{\text{охл}}$, кг/цикл</p> $G_{\text{охл}} = \frac{Q_1'}{(c_{\text{охл}} \cdot (t_1'' - t_2''))}$ <p>где Q_1' – теплота, которая нужна для охлаждения аппарата и адсорбента, кДж/цикл; $c_{\text{охл}}$ – средняя удельная теплоемкость газа охлаждения при температурах ($t_1'' - t_2''$), кДж / (кг · °С); $t_1'' - t_2''$ – температура газа охлаждения на входе и выходе из адсорбера соответственно, °С.</p>
<p>Тепловая нагрузка печи, $Q_{\text{печи}}$, МДж/цикл</p> $Q_{\text{печи}} = G_{\text{рег}} \cdot c_2 \cdot (t_2 - t_1)$ <p>где c_2 – средняя удельная теплоемкость газа при температурах ($t_2 - t_1$), кДж/(кг · °С); t_1, t_2 – температуры газа при входе и выходе в печь.</p>

Таблица 7. Результаты расчета осушки газа на цеолитах
 Table 7. Calculation results of gas drying on zeolites

Параметр	NaX-BC	NaX	CaA	NaA-BC	NaA
1	2	3	4	5	6
Требуемая масса адсорбента G_a , кг	16040	22741	23310	16759	25407
Объем слоя адсорбента V_a , м ³	26	33	34	25	30
Расчетный внутренний диаметр адсорбера $D_{вн}$, м	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
1	2	3	4	5	6
Высота слоя адсорбента, H_a , м	2,50	3,2	3,3	2,4	2,9
Высота цилиндрической части адсорбера H , м	5	6	6	6	5,5
Масса аппарата $M_{ап}$, кг	57492	68990	68990	68990	63240
Количество теплоты для нагрева базовой части Q_1 , кДж/цикл	12051557	15295147	15430766	13868049	15108473
Количество теплоты для нагрева десорбированной влаги Q_2 , кДж/цикл	555684622	555684622	555684622	555684622	555684622
Количество теплоты для нагрева всей системы десорбированной влаги Q_T , кДж/цикл	567736179	570979769	57111538	569552671	570793095
Расход газа регенерации $G_{рег}$, кг/цикл	791947	796485	796675	794489	796224
Расход газа охлаждения $G_{охл}$, кг/цикл	78397	99497	100379	90213	98283
Тепловая нагрузка печи, $Q_{печи}$, МДж/цикл	618657	622203	622351	620643	621998

Далее был проведен технологический расчет процесса адсорбционной осушки с применением различных цеолитных адсорбентов, характеристики которых представлены в таблице 5 [11].

Основные формулы технологического расчета представлены в таблице 6.

Результаты проведенных расчетов трехадсорберной технологической схемы адсорбционной осушки газа на указанных адсорбентах по основным показателям представлены в таблице 7.

Рассматривая результаты, представленные в таблице 7, можно провести анализ работы использованных адсорбентов в условиях трехадсорберной принципиальной схемы установки осушки газа при производстве СПГ.

Таблица 9. Результаты расчетов
Table 9. Calculation results

Параметр	3-адсорберная схема	2-адсорберная схема
Требуемая масса адсорбента для осушки G_a , кг	32080	32080
Необходимый объем адсорбента V_a , м ³	52	52
Расчетный внутренний диаметр адсорбера $D_{вн}$, м	3,6	3,6
Высота слоя адсорбента в одном адсорбере, H_a , м	2,50	5
Высота цилиндрической части адсорбера H , м	5	9
Масса одного адсорбера $M_{ап}$, кг	57492	91987
Масса адсорберов в технологической схеме, кг	172476	183974
Количество теплоты для нагрева адсорбера в технологической схеме Q_1 , кДж/схема	24103113	20812979
Количество теплоты для нагрева десорбированной влаги Q_2 , кДж/схема	1111369244	1111369244
Количество теплоты для нагрева всей системы десорбированной влаги Q_T , кДж/схема	1135472357	1132182223
Расход газа регенерации $G_{рег}$, кг/схема	1583894	1579291
Расход газа охлаждения $G_{охл}$, кг/схема	156792	135391
Тепловая нагрузка печи, $Q_{печи}$, МДж/схема	1237314	1233719

– Двухадсорберная схема адсорбционной осушки газа также может быть использована при крупнотоннажном производстве СПГ.

– Двухадсорберная схема адсорбционной осушки газа более компактная и сравнительно более простая в управлении, имеет меньшее количество технологических газопроводов обвязки между адсорберами в технологической схеме и соответственно меньшее число необходимых приборов КИП для измерения температуры, давления, расходов и т.п., также при ее использовании незначительно меньше тепловые затраты.

Следует отметить, что выбор той или иной технологии адсорбционной осушки осуществляется при анализе многих факторов, начиная от климатических условий и местоположения установки и заканчивая типом применяемого адсорбента, времени его активного действия, составом и расходом газа, поступающего на осушку, его влагосодержания, а также требованиями влагосодержания на выходе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mokhatab S. Handbook of Liquefied Natural Gas / S. Mokhatab, J.Y. Mak, J.V. Valappil, D.A. Wood. Oxford : Elsevier Inc., 2014. 589 p.
2. 2019 World LNG Report. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.igu.org/sites/default/files/nodenews_itemfield_file/IGU%20Annual%20Report%202019_23%20loresfinal.pdf
3. Мельников В. Б. Промысловый сбор и переработка газа и газового конденсата: Учебник. М. : Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2017. 464 с.
4. Афанасьев А. И., Бекиров Т. М., Барсук С. Д. Технология переработки природного газа и конденсата: Справочник. М. : Недра, 2002. 517 с.
5. Гафарова Э. Б., Мельников В. Б., Федорова Е. Б. Роль и значение адсорбции в газовой промышленности. // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 4. С. 67-76
6. Terrigeol A. Molecular sieves in gas processing: Effects and consequences by contaminants [Электронный ресурс] // Gas Processing & LNG. – Режим доступа: <http://www.hydrocarbonprocessing.com/Article/3137897/GasProcessing-or-LNG-Amines/Molecular-sieves-in-gas-processing-Effects-andconsequences-by-contaminants.html>
7. Гречко А. Г., Новиков А. И. Возможные направления оптимизации проектов крупнотоннажного производства сжиженного природного газа // Газовая промышленность. 2017. №6(753). С.74-81.
8. Официальный сайт Ямал СПГ – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://yamallng.ru/>;

9. Российский рынок газа. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gazprom.ru/about/marketing/russia/>
10. Мельников В. Б., Федорова Е. Б., Макарова Н. П., Гафарова Э. Б. Технологический расчёт адсорбционной осушки газа для производства СПГ: Учебное пособие. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2017. 35 с.
11. Melnikov V. B., Fedorova E. B., Gafarova E. B. Comparative evaluation of adsorbents for natural gas dehydration at liquefied natural gas plant. Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2020. №1. С.31-35.
12. Гафарова Э. Б., Мельников В. Б., Макарова Н. П., Федорова Е. Б. Исследование регенерации цеолитсодержащих адсорбентов // Нефтепромышленное дело. 2021. №7(631). С. 46-48
13. Аджиев А. Ю., Морева Н. П., Долинская Н. И. Отечественные цеолиты для глубокой осушки газа при производстве сжиженного природного газа // Нефтегазохимия. 2015. С. 34-38
14. Официальный сайт компании Ишимбайские Сорбенты – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zeolitegroup.ru/ru/index.html>
15. Официальный сайт компании Нижегородские сорбенты – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nisorbent.ru/>

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Гафарова Элиза Багаудиновна, старший преподаватель, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, (119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1, Российская Федерация), gafarovaeliza@mail.ru

Гафарова Элиза Багаудиновна, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, (119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1, Российская Федерация), доктор. хим. наук, профессор, gafarovaeliza@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Гафарова Э.Б. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Мельников В.Б. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF KEY PROCESS INDICATORS ADSORPTION DRYING IN PRODUCTION LIQUEFIED NATURAL GAS

Eliza B. Gafarova,
Vyacheslav B. Melnikov

National University of Oil and Gas "Gubkin University"

*for correspondence: gafarovaeliza@mail.ru



Article info

Submitted:

19 November 2021

Approved after reviewing:

30 March 2022

Accepted for publication:

29 April 2022

Keywords: liquefied natural gas, LNG, adsorption gas dehydration, zeolites, technological schemes

Abstract.

The article presents the results of the technological calculation of the schemes used with two and three adsorbers of the process of drying natural gas before liquefaction in the production of liquefied natural gas for five different adsorbents of domestic manufacturers. The purpose of this calculation is to minimize the cost of drying gas and to identify the most efficient use of the properties of the adsorbent and the optimal technological scheme of this process. For each of these cases, the required amount of adsorbent was calculated, the main dimensions of the apparatus that ensure the operation of the process, the calculation of the consumption of regeneration and cooling gas, heat costs, and so on. Based on the results of the calculation, a comparative analysis was carried out on the main indicators of the process and further calculation was carried out when replacing the three-cylinder scheme of the installation with a two-cylinder one using NaX zeolite without binder, which also showed higher efficiency when using a two-cylinder scheme. As a result of the study, it was revealed that today the domestic industry has developed and is developing efficiently working dehumidifiers that allow achieving the required moisture dew point value for gas coming from the adsorption dehydration unit for the production of liquefied natural gas. These adsorbents can serve as an equivalent replacement for foreign adsorbents used at many domestic plants in the preparation of gas for liquefaction.

For citation: Gafarova E.B., Melnikov V.B. Comparative analysis of key process indicators adsorption drying in production liquefied natural gas. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2022; 2(150):31-41. (In Russ., abstract in Eng.). doi: 10.26730/1999-4125-2022-2-31-41

REFERENCES

1. Mokhatab S. Handbook of Liquefied Natural Gas / S. Mokhatab, J.Y. Mak, J.V. Valappil, D.A. Wood. - Oxford : Elsevier Inc.; 2014.
2. 2019 World LNG Report. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://www.igu.org/sites/default/files/nodenews_itemfield_file/IGU%20Annual%20Report%202019_23%20loresfinal.pdf
3. Mel'nikov V.B. Promyslovyy sbor i pererabotka gaza i gazovogo kondensata: Uchebnik. – M.: Rossijskij gosudarstvennyj universitet nefti i gaza (NIU) imeni I. M. Gubkina; 2017. 464 p.
4. Afanas'ev A.I., Bekirov T.M., Barsuk S.D. Tekhnologiya pererabotki prirodnogo gaza i kondensata: Spravochnik M.: Nedra, 2002. 517 p.
5. Gafarova E.B., Mel'nikov V.B., Fedorova E.B. Rol' i znachenie adsorbicii v gazovoj promyshlennosti. *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2018; 4:67-76.
6. Terrigeol A. Molecular sieves in gas processing: Effects and consequences by contaminants [Elektronnyj resurs] Gas Processing & LNG. – Rezhim dostupa: <http://www.hydrocarbonprocessing.com/Article/3137897/GasProcessing-or-LNG-Amines/Molecular-sieves-in-gas-processing-Effects-andconsequences-by-contaminants.html>
7. Grechko A.G., Novikov A.I. Vozmozhnye napravleniya optimizacii proektov krupnoton-nazhnogo proizvodstva szhizhennogo prirodnogo gaza. *Gazovaya promyshlennost'*. 2017; 6(753):74-81.
8. Oficial'nyj sajt YAmal SPG – [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://yamallng.ru/>;
9. Rossijskij rynek gaza. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.gazprom.ru/about/marketing/russia/>

10. Mel'nikov V.B., Fedorova E.B., Makarova N.P., Gafarova E.B. Tekhnologicheskij raschyot adsorbcionnoj osushki gaza dlya proizvodstva SPG: Uchebnoe posobie. M.: Izdatel'skij centr RGU nefti i gaza (NIU) imeni I. M. Gubkina; 2017.

11. Melnikov V.B., Fedorova E.B., Gafarova E.B. Comparative evaluation of adsorbents for natural gas dehydration at liquefied natural gas plant. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020; 1:31-35.

12. Gafarova E.B., Mel'nikov V.B., Makarova N.P., Fedorova E.B. Issledovanie regeneracii ceolitsoderzhashchih adsorbentov. *Neftepromyslovoe delo*. 2021; 7(631):46-48.

13. Adzhiev A.Yu., Moreva N.P., Dolinskaya N.I. Otechestvennye ceolity dlya glubokoj osushki gaza pri proizvodstve szhizhennogo prirodnogo gaza. *Neftegazohimiya*. 2015; 34-38 p.

14. Oficial'nyj sajt kompanii Ishimbajskie Sorbenty – [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://zeolitegroup.ru/ru/index.html>

15. Oficial'nyj sajt kompanii Nizhegorodskie sorbenty – [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.nisorbent.ru/>

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Eliza B. Gafarova, Senior Lecturer, National University of Oil and Gas "Gubkin University", (119991 Moscow, Leninsky prospect, 65, building 1, Russian Federation), gafarovaeliza@mail.ru

Vyacheslav B. Melnikov, National University of Oil and Gas "Gubkin University", (119991 Moscow, Leninsky prospect, 65, building 1, Russian Federation), Dr. Sc. in Chemistry, Professor, v.mel@mail.ru

Contribution of the authors:

Eliza B. Gafarova - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Vyacheslav B. Melnikov - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

