

Технологии СПГ и вызовы современного энергетического рынка
(LNG technologies and challenges of the modern energy market)

Мещерин И.В.

доцент кафедры газохимии

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,

Президент

Национальная палата инженеров

АННОТАЦИЯ

Разработан принцип экспресс-анализа проектов строительства заводов СПГ с применением индекса сложности, который оценивает уровень мощности первичных преобразований сырьевого газа на заводах СПГ, систем хранения и отгрузки по отношению к конечной производительности сжижения. Предлагаемый подход позволяет учитывать сложность строительства с учетом, например, стоимости земли, или стоимости электроснабжения, для которых могут быть вычислены и добавлены к идеальному случаю аналогичные коэффициенты. Производительность в этом случае влиять не будет.

ABSTRACT

The principle of express analysis of LNG plant construction projects using a complexity index has been developed, which evaluates the power level of primary transformations of raw gas at LNG plants, storage and shipment systems in relation to the final liquefaction capacity. The proposed approach makes it possible to take into account the complexity of construction, taking into account, for example, the cost of land, or the cost of electricity supply, for which similar coefficients can be calculated and added to the ideal case. Performance in this case will not be affected.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СПГ, экспресс анализ, строительство, оценка стоимости

KEYWORDS

LNG, express analysis, construction, cost estimation

В начале 2000-х под руководством автора статьи была разработана и в 2008 году утверждена Советом директоров ОАО «Газпром» пионерная Стратегия развития сегмента СПГ. Согласно документу, к 2023 году планировалось производить 75-124 млн. тон криогенного продукта на различных проектах, в первую очередь «Сахалин-2», «Штокман» и на Ямале в кооперации с Новатэк. Сахалинская энергия уже в 2009 году ввела мощности на 11-12 млн. тон. В тот год ни США (4% мировых запасов), ни Австралия (2% мировых запасов) СПГ не производили. Кто мог подумать, что уже в 2021 году обе эти страны обгонят Катар (13% мировых запасов). Австралия введёт 92 млн. тон годовых мощностей по сжижению, а США 88 млн. тон. Россия (29% мировых запасов) в 2021 году произвела лишь 32 млн. тон СПГ.

В 2009 году в предисловии к книге «Морская транспортировка газа» автор писал, что для России «альтернативы СПГ не просматривается». Сегодняшняя ситуация со значительными технологическими ограничениями на криогенные технологии, в сочетании с беспрецедентными диверсиями на морских газопроводах со всей

очевидностью показывает, что проблему выхода к морю, которая веками стоит перед нашей страной, России для природного газа может решить только путем масштабного развития индустрии СПГ. И делать это следует максимально собственными силами. Сможет страна космических полётов и ядерной энергетики произвести рабочие технологические цепочки с компрессорами и большими криогенными теплообменниками высокой производительности, наша газовая промышленность останется конкурентоспособной, а экономика пойдет в рост.

Лидерам нашей промышленности – в первую очередь Минпромторгу, Новатэку и Газпрому – следует инвестировать не только в теоретические и лабораторные исследования. Необходимо строить опытно-промышленные установки производительностью 30-50 тыс. тон в год, тестировать на них процессы и отечественное оборудование, а далее масштабировать в крупнотоннажные линии мощностью более 500 тыс. тон в год. Строить типовые модули высокой заводской готовности. Собирать из них батареи по несколько линий для повышения суммарной производительности.

В мировой проектной и исследовательской практике широко применяется коэффициент сложности нефтеперерабатывающего завода (НПЗ), который базируется на использовании обоснованных и рассчитанных еще в 1960-е гг. индексов Нельсона, которые представляют собой отношение удельных затрат на сооружение установки любого из процессов, применяемых на НПЗ, к удельным затратам на установку первичной переработки нефти.

Данные коэффициенты сложности составляют базовый элемент развитой В. Нельсоном методики оценки комплексности НПЗ. На основании индексов Нельсона и долей отдельных процессов, исчисленных по отношению к мощности первичной переработки нефти, определяется рейтинг сложности НПЗ. Он складывается как сумма произведений коэффициентов сложности каждого процесса в составе НПЗ на долю этого процесса. По существу, это относительная средневзвешенная капиталоемкость переработки нефти на заводе с данной технологической схемой. [1]

Подобные исследования для газоперерабатывающих заводов, тем более для заводов по производству СПГ не проводились.

Автором разработан принцип экспресс-анализа проектов строительства заводов СПГ с применением индекса сложности, который оценивает уровень мощности первичных преобразований сырьевого газа на заводах СПГ, систем хранения и отгрузки по отношению к конечной производительности сжижения.

Индекс сложности присваивает коэффициент каждой единице основного оборудования (установке, блоку) в составе завода СПГ на основе её сложности и стоимости в сравнении с наиболее простым, с точки зрения получения из природного газа жидкости, криогенным блоком, использующим в качестве сырья чистый метан. Понятно, что в реальной практике не встречается ситуация, когда поток сырьевого газа на 100% состоит из метана, и, следовательно, выходящий поток СПГ количественно равен входящему. Используем идеальную ситуацию для целей исследования, и присваиваем такому криогенному блоку коэффициент сложности 1,0.

Реальный состав потока сырьевого газа на входе в завод по сжижению всегда будет в различной степени отличаться от идеального. На практике, для повышения качества сырья используют различные установки, извлекающие из него механические примеси, воду, конденсат, кислые газы, серосодержащие элементы, ртуть, азот, гелий, неметановые углеводородные газообразные фракции.

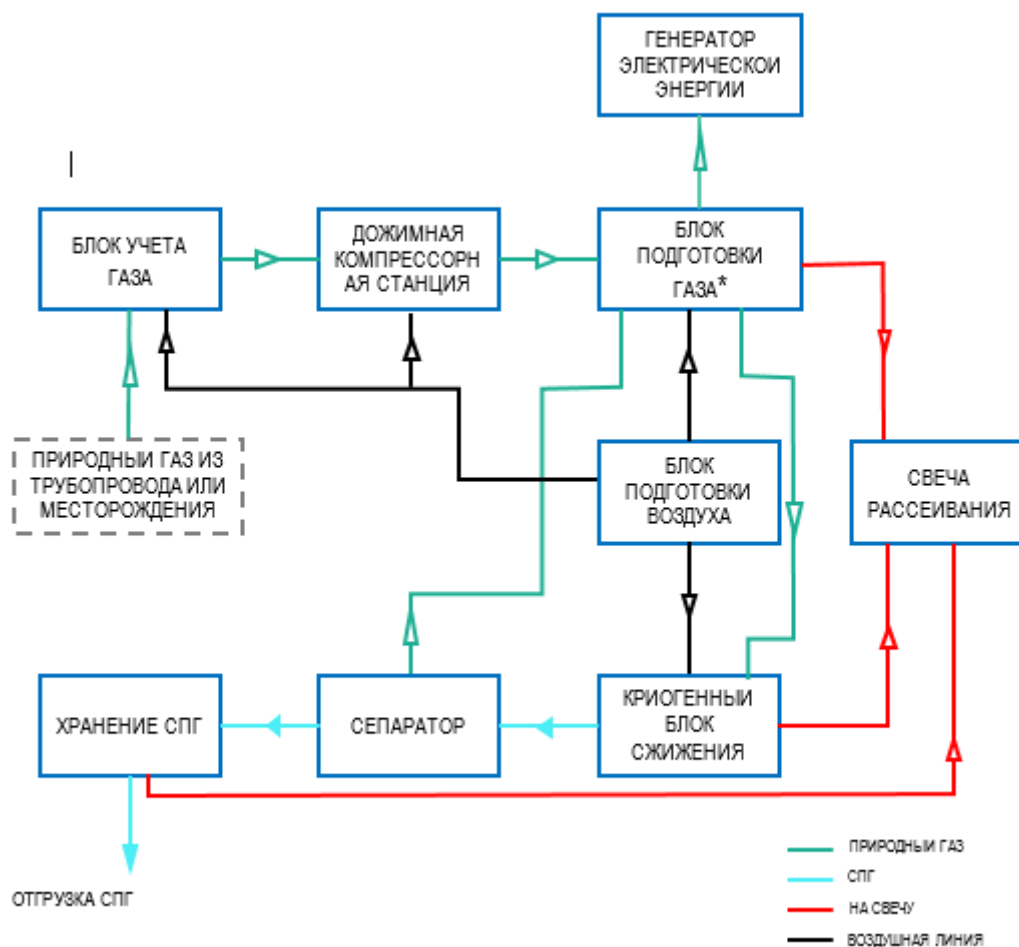


Рис. 1 Блок-схема малотоннажного завода СПГ

Сложность каждой такой установки предлагается вычисляться путем умножения коэффициента, отражающего её стоимость, на коэффициент негативного влияния на количество получаемого конечного продукта – СПГ – за счет потерь производительности на выходе завода.

Суммируя значения сложности, полученные для каждой единицы оборудования, в том числе по криогенному блоку, определяют суммарную «сложность завода СПГ по индексу».

Индекс сложности указывает не только на интенсивность инвестиций или уровень капитальных вложений в строительство завода СПГ, но и его потенциал добавленной стоимости. Чем выше индекс, тем выше относительная стоимость завода СПГ, ниже его относительная производительность и ниже конкурентоспособность его продукции.

Для расчета коэффициента сложности установки для идеального криогенного блока подготовки применим формулу [3]:

$$N = \frac{P}{Q},$$

где N – коэффициент сложности;

P – стоимость капитальных вложений в строительство криогенного блока, млн.руб;

Q – производительность криогенного блока по сырью, равная его производительности по выходному продукту, т/час.

Далее последовательно рассчитываем коэффициенты для каждой установки, которая входит в состав завода по сжижению.

$$N_i = \frac{P_1 + P_i}{P_1},$$

где N_i – коэффициент учитывающий рост капиталовложений, вызванный строительством i -й установки в составе завода.

Например, стоимость строительства криогенного блока с производительностью 5 т/ч равна 310,12 млн. рублей. Удельные затраты на его строительство равны:

$$\frac{310,12 \text{ млн. руб}}{5 \text{ т/час}} = 62,02 \frac{\text{млн. руб час}}{\text{т}}$$

Принимаем индекс капиталовложений для криогенного блока равным 1 и приравниваем к полученному значению: $62,02 \frac{\text{млн.руб час}}{\text{т}} = 1$.

При добавлении установки очистки от кислых компонентов производительность завода по сырью по-прежнему составляет 5 т/ч, стоимость установки совместно с блоком сжижения составит $310,12 + 8,85 = 318,97$ млн. рублей. Удельные затраты на строительство составят:

$$\frac{318,97 \text{ млн. руб}}{5 \text{ т/час}} = 63,79 \frac{\text{млн. руб час}}{\text{т}}$$

Затраты на строительство завода с данной установкой больше, чем для строительства одного криогенного блока в 1,03 раза. Следовательно, коэффициент роста затрат для выбранных блоков равен 1,03.

Потери на каждом блоке установки примем согласно нормам технологического проектирования газоперерабатывающих заводов. [3] С их учетом рассчитаем индекс потерь производительности:

$$s = \frac{Q - q}{Q},$$

где q – потери производительности по выходному продукту.

Например, для очистки от кислых компонентов данный индекс составит:

$$s = \frac{5 - 5 \cdot 0,4}{5} = 0,6$$

Сложность установки рассчитываем по формуле:

$$C = N \cdot S$$

Для установки очистки от кислых компонентов данная величина составит:

$$C = 1,03 \cdot 0,6 = 0,62$$

Чтобы оценить сложность всего завода необходимо просуммировать величины сложности, вычисленные аналогично по каждой установке, как показано в таблице 1.

Таблица 1 Последовательность вычислений

Стоимость Млн. руб	P_1	P_2	...	P_i
Производительность тон в час	Q	$Q - q_2$	...	$Q - q_i$
Коэффициент роста затрат	$N_1 = P_1 / Q = 1$	$N_2 = (P_1 + P_2) / P_1$	...	$N_i = (P_1 + P_i) / P_1$
Коэффициент снижения производительности	$S_1 = (Q - q_1) / Q$ в общем случае $q_1 = 1$	$S_2 = (Q - q_2) / Q$	...	$S_i = (Q - q_i) / Q$
Индекс сложности	$C_1 = N_1 S_1$	$C_2 = N_2 S_2$	...	$C_i = N_i S_i$

Индекс сложности:

$$\sum_{i=1}^n N_i S_i \rightarrow C_n = \sum_{i=1}^n N_i S_i$$

Для полной оценки степени совершенства технологической структуры завода СПГ с экономических позиций, индексы и рейтинги сложности могут оказаться недостаточными при всей их самостоятельной ценности. Известно, что сжиженный газ может иметь различные составы и температуру. Рейтинг сложности может достигаться совершенно разными технологическими средствами. Кроме того, количество получаемого конечного продукта (СПГ) будет отличаться от количества входного сырьевого газа на величину отделенных примесей, потерь в аппаратах и энергозатрат. Эти потери включены в формулу.

Рассмотрим примерные параметры двух малотоннажных заводов СПГ.

Вариант 1 – с производительностью 5 т/час, предназначенная для сжижения сырьевого газа на месторождении.

Вариант 2 – с производительностью 2 т/час, предназначенная для сжижения сырьевого газа из Единой системы газоснабжения (ЕСГ).

На рисунке 1 приведена блок-схема для двух вариантов. На рисунке 2 раскрыта более сложная схема блока подготовки газа для варианта 1.

В таблицах 1 и 2 представлены составы сырьевого газа и СПГ на выходе криогенного блока для каждого из вариантов.

Таблица 2 - Компонентный состав природного газа на выходе и выходе из установки комплексной подготовки газа для завода с производительностью 5 т/ч

Компонент	Вход	Выход
Метан	90,92	91,78
Этан	4,89	4,99
Пропан	0,78	0,80
Изобутан	0,12	0,13
Н-бутан	0,18	0,18
Изопентан	0,05	0,06
Н-пентан	0,00	0,04
Н-гексан	0,05	0,04
Н-Гептан	0,06	0,03
Н-Октан	0,02	0,02
Азот	2,31	1,93
Гелий	-	-
O ₂	-	-
H ₂	0,02	0,00
H ₂ O	0,02	0,00
H ₂ S	0,18	0,00
CO ₂	0,39	0,00

Таблица 3 - Компонентный состав природного газа на выходе и выходе из установки комплексной подготовки газа для завода с производительностью 2 т/ч

Компонент	Вход 2т	Выход 2 т
Метан	95,47	96,36
Этан	1,92	1,82
Пропан	0,51	0,52
Изобутан	0,08	0,08
Н-бутан	0,08	0,08
Изопентан	0,02	0,02
Н-пентан	0,00	0,02
Н-гексан	0,01	0,01
Н-Гептан	-	-
Н-Октан	-	-
Азот	1,39	1,08
Гелий	0,02	0,00
O ₂	0,01	0,01
H ₂	0,00	0,00
H ₂ O	0,00	0,00
H ₂ S	0,00	0,00
CO ₂	0,50	0,00

Стоимость оборудования и монтажа корректно подсчитать достаточно сложно. Тем более общестроительные работы, стоимость земли и подвода коммуникаций. В таблицах 4 и 5 представлены примерные расчеты индекса сложности для новых малотоннажных заводов СПГ в конфигурациях, демонстрирующих особенности, присущие каждому варианту.

Таким образом, для завода производительностью 5 т/ч индекс сложности составляет 6,26, а для завода производительностью 2 т/ч – 2,61.

Очевидно, что сооружение завода СПГ на сырьевом газе, полученном из месторождения сложнее, чем на сырье, полученном из ЕСГ, так как этот газ уже был подготовлен к магистральному транспорту. Однако, состав сырьевого газа различных месторождений также может весьма различным, что повлияет на индекс сложности. Следует ожидать, что для малотоннажных производств СПГ, использующих технологии открытого и закрытого цикла, значения рейтинга сложности при выборе технологии сжижения могут давать информацию для принятия решения уже на ранних стадиях без проведения дорогостоящих расчетов.

Таблица 4 Показатели завода сжижения с производительностью 5 т/ч

Установка	Стоимость, млн. Руб.	Производительность т/час	Коэффициент роста затрат	Потери производительности %	Коэффициент потери производительности	Индекс сложности
Криогенный блок холодильная система с компрессорами хладагента	310,12	5	1,00	0	1	1
Установка очистки от мехпримесей	12	5	1,04	0	1	1,04
Установка очистки от кислых газов	8,85	5	1,03	0,4	0,6	0,62
Установка осушки газа	13,275	5	1,04	0,3	0,7	0,73
Установка очистки от серосодержащих элементов	17,7	5	1,06	0,4	0,6	0,63
Установка очистки от ртути	4,425	5	1,01	0,3	0,7	0,71
Установка фракционирования	19,9125	5	1,06	0,5	0,5	0,53
Итого:						6,26

Таблица 5 Показатели завода сжижения с производительностью 2 т/ч

Установка	Стоимость, млн. Руб.	Производительность т/час	Коэффициент роста затрат	Потери производительности %	Коэффициент потери производительности	Индекс сложности
Криогенный блок холодильная система с компрессорами и хладагента	120	2	1,00	0,00	1	1,00
Блок адсорбционной осушки и очистки газа	50	2	1,42	0,50	0,5	0,71
Дожимная компрессорная станция (ДКС)	34	2	1,28	0,30	0,7	0,90
Итого:						2,61

Стоимость подготовки газа часто зависит от технологии сжижения. Например, для цикла высокого давления большая часть воды «вываливается» при компремировании газа до 200 бар. Кроме того, на таком высоком давлении габариты, и соответственно,

стоимость адсорберов для очистки и осушки становятся значительно меньше, чем при давлении 40-50 бар, как в установках полного сжижения, работающих по смесевому или азотному циклу.

На заводах сжижения на ГРС, применяющих открытые циклы, сушить и чистить надо намного большее количество газа, чем производится СПГ. Эти технологии устроены таким образом, что весь поток газа, поступающий на установку, необходимо осушить, а очистить от CO₂ надо примерно 30% входного потока. При этом коэффициент ожижения всего 10-12%. То есть для установки производительностью 5 тонн/час по СПГ осушка работает на 50 тонн/час по сырьевому газу, а очистка от CO₂ – на 15 тонн/час. Весь подготовленный, но неожиженный холодный газ сбрасывается в сеть низкого давления.

Значительным неудобством при работе над данным показателем для автора является отсутствие корректных данных по капитальным вложениям и потерям, следовательно, по индексам сложности для некоторых из процессов, которые могут использоваться на рассматриваемом заводе.

Индексы и рейтинги сложности заводов СПГ удобны для экспресс-оценки необходимых инвестиций в сооружение как малотоннажных, так и средние и крупнотоннажных установок, что наиболее важно для экспертизы технико-экономических обоснований проектов нового строительства и реконструкции. У предлагаемых показателей есть особенность, обусловленная их сравнительно узким назначением: они характеризуют меру сложности технологической структуры заводов СПГ с затратной стороны (по капиталоемкости) с учетом потерь производительности по качеству сырья. Это не недостаток, а специфическая функция данных показателей.

Предлагаемый подход позволяет учитывать сложность строительства с учетом, например, стоимости земли, или стоимости электроснабжения, для которых могут быть вычислены и добавлены к идеальному случаю аналогичные коэффициенты. Производительность в этом случае влиять не будет.

Задача решена в общем виде, поэтому представляется возможным применение предлагаемого подхода для заводов любой мощности. В случае расчета индекса сложности для крупнотоннажного производства, важным будет знать потери газа в каждой установке, в том числе в криогенном блоке. К сожалению, такие данные в открытых источниках отсутствуют, что ограничивает возможности ведения научной работы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Справочник химика. О. Брагинский Коэффициент сложности процесса <https://www.chem21.info/info/671230/>
2. Нормы технологического проектирования газоперерабатывающих заводов http://blueline.ru/press-center/library/regulatory-support/%D0%A0%D0%94_39_135_94.pdf
3. З.И. Сафин, А.Ф. Кемалов, Р.А. Кемалов, Н.А. Терентьева «Комплексная оценка нефтеперерабатывающих заводов и заводов по переработке тяжелых нефтей и природных битумов» <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-otsenka-neftepererabatyvayuschih-zavodov-i-zavodov-po-pererabotke-tyazhelyh-neftey-i-prirodnih-bitumov>