

УДК 665.71

И.В. Мещерин¹, e-mail: mescherin@bk.ru

¹ Кафедра газохимии, ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет (Национальный исследовательский университет) нефти и газа имени И. М. Губкина» (Москва, Россия).

Оптимизация технологий сжижения природного газа с целью повышения экономической эффективности процесса

Для поддержания экономического роста требуется непрерывное производство энергии. Падающие запасы нефти, рост экологических проблем и жесткая конкуренция на мировом рынке способствовали увеличению доли более чистых источников энергии, таких как природный газ. Большая часть запасов природного газа находится в отдаленных местах, и для доставки на мировой рынок требуется его сжижение. Установки сжижения природного газа (СПГ) получают сырье из разных источников, поэтому, чтобы оставаться экономически эффективными при колебаниях состава газа, необходима оперативная оптимизация процесса сжижения. В качестве основного критерия оптимизации в процессе получения СПГ обычно используется себестоимость сжижения по данному технологическому процессу. Однако множество допустимых вариантов и большое количество переменных, влияющих на себестоимость, приводят к тому, что оптимизация технологии СПГ является весьма трудоемкой и сложной задачей. В работе рассматривается применение в качестве метода оптимизации алгоритм покоординатного спуска для двух наиболее распространенных СПГ-технологий. Суть данного метода заключается в эквивалентной замене общей многопараметрической задачи поиска экстремума критерия последовательностью однопараметрических задач поиска частных экстремумов. Основной целью оптимизации при сжижении природного газа в большинстве случаев является минимизация энергии компримирования. Алгоритмом покоординатного спуска можно достичь до 15% экономии энергии по сравнению с вариантом реализации процессов, сбалансированных вручную. Данная методология хорошо работает с процессами заводов СПГ, но не ограничивается ими и может быть использована для любой модели другого технологического процесса.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, энергоэффективность, оптимизация, себестоимость.

.....

I.V. Meshcherin¹, e-mail: mescherin@bk.ru

¹ Gaschemistry Department, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russia).

Optimization technology liquefaction natural gas in order to increase the economic efficiency of the process

In order to maintain economic growth a continuous energy generation is required. Decreased oil reserves, rising environmental issues and fierce competition in the world market contributed to an increase of the cleaner energy sources share, such as natural gas. Most of the natural gas reserves are located in remote areas and to deliver it to the world market it should be liquefied. Natural gas liquefaction units (LNG units) receive raw materials from different sources, so in order to maintain cost-effectiveness at the gas composition deviation prompt optimization of the liquefaction process is required. The main criterion of the LNG production optimization liquefaction production cost of this manufacturing process is commonly used. However, the set of feasible options and a large number of variables that affect the cost lead to the fact that the optimization of LNG technology is a very time-consuming and difficult task. This paper considers the application of algorithm of coordinate-wise reduction for the two most common LNG technologies as a method of optimization. The essence of this method is an equivalent replacement of the general multiparameter task of criteria extremum search by the sequence of one-parameter tasks of private extremums search. The main objective of optimization during the natural gas liquefaction is to minimize the compression energy in most cases. Coordinate-wise algorithm can achieve up to 15% energy savings as compared to the option of the manually balanced processes. This methodology works well with the processes of LNG plants, but is not limited thereto and can be used for any other process model.

Keywords: liquefied natural gas, energy efficiency, optimization, cost price.

Энергия является главным фактором мировой экономики и формирует среду глобального обитания, где все потребности являются взаимозависимыми. Для поддержания экономического роста требуется непрерывное производство энергии. Падающие запасы нефти, рост экологических проблем и жесткая конкуренция на мировом рынке способствовали увеличению доли более чистых источников энергии, таких как природный газ. По различным прогнозам, с 2015 по 2030 г. спрос на природный газ будет значительно увеличиваться, до 60%. Большая часть запасов природного газа находится в отдаленных местах, и для доставки на мировой рынок требуется его сжижение. Непосредственно процесс сжижения газа потребляет в зависимости от технологий и объемов 15–25% от общей энергии газа. Таким образом, даже небольшое увеличение

эффективности сжижения природного газа улучшает конкурентоспособность и сокращает энергетические затраты. Помимо повышения эффективности сжижения усилия исследователей также направлены на использование энергии холода от СПГ, например для выработки электроэнергии по циклу Ренкина. Электрогенерация производится в термодинамическом цикле, в котором сжиженный природный газ является холодным источником, а морская вода – теплым. В качестве хладагента применяется фреон.

Для оптимизации криогенной эксергии используется многокомпонентный органический цикл Ренкина [1]. Эффективность цикла будет максимальной, если теплообмен между цикловым флюидом (хладагентом) и СПГ будет происходить при температуре сжиженного газа или если кривая конденсации хладагента

максимально приближается к кривой испарения СПГ. Исходя из этого, фреон, конденсация которого происходит при постоянной температуре ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), может быть заменен смесью углеводородов, состав которой подбирается таким образом, чтобы получилось максимальное приближение кривых конденсации. Энергия холода при регазификации СПГ также используется для опреснения воды, получения сухого льда и т.д. [2]. В течение долгого времени под влиянием рыночного спроса развивались несколько технологий сжижения природного газа [3]. Среди наиболее часто коммерчески реализуемых технологий получения СПГ можно выделить SMR (один смешанный хладагент) и СЗМР (смешанный хладагент с пропановым предварительным охлаждением) – процессы для средне- и крупнотоннажных установок соответственно.

Ссылка для цитирования (for citation):

Мещерин И.В. Оптимизация технологий сжижения природного газа с целью повышения экономической эффективности процесса // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 3. С. 146–152.

Meshcherin I.V. Optimization technology liquefaction natural gas in order to increase the economic efficiency of the process (In Russ.). *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2016, No. 3, pp. 146–152.

XXIII специализированная выставка



ОАО «Тюменская ярмарка»

Адрес: Россия, 625013, г. Тюмень, ул. Севастопольская, 12, Выставочный зал
 телефакс: (3452) 48-55-56, 48-66-99, 48-53-33; e-mail: tyumfair@gmail.com. www.expo72.ru



2016

НЕФТЬ И ГАЗ

Топливо энергетический комплекс

20-23
сентября



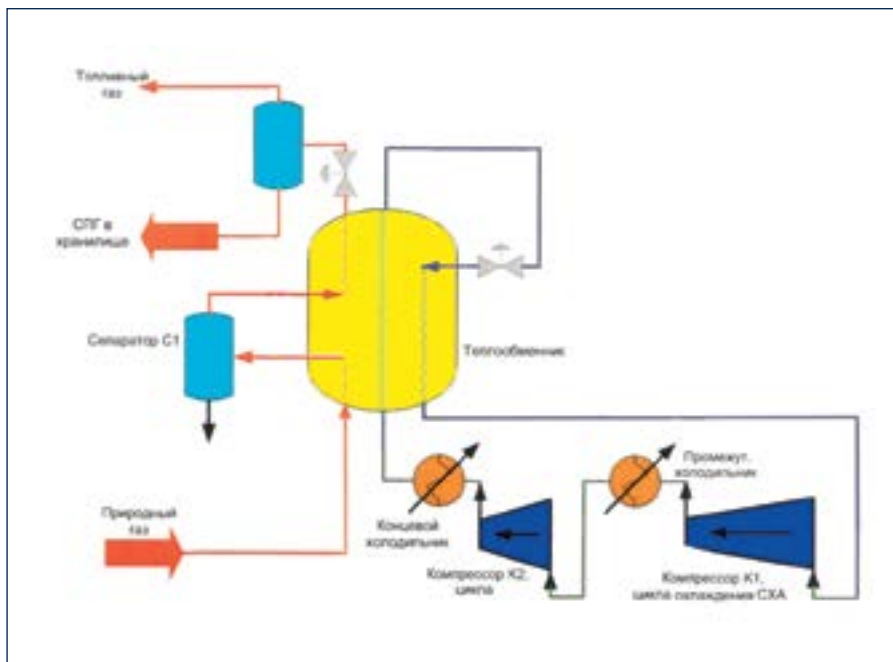


Рис. 1. Технологическая схема процесса SMR [12]

Fig. 1. SMR process diagram [12]

Установки СПГ получают сырье из разных источников. Часто в процессе разработки месторождения компонентный состав газа может изменяться. Еще более динамичным может быть состав газа, поставляемого на сжижение по трубопроводу. Если для первого случая (в РФ это такие проекты, как Ямал СПГ и Штокман СПГ) данный фактор изменяется достаточно медленно, то для проектов заводов СПГ, увязанных с газопроводами (Балтийский СПГ, СПГ на КС «Портовая» и Владивосток СПГ), изменение состава газа может серьезно влиять на параметры технологии сжижения, поэтому, чтобы оставаться экономически эффективными, заводам необходима оперативная оптимизация процесса. Для решения этой проблемы применяются сложные подходы оптимизации [4]. С другой стороны, нередко практически применимые результаты могут быть получены и с использова-

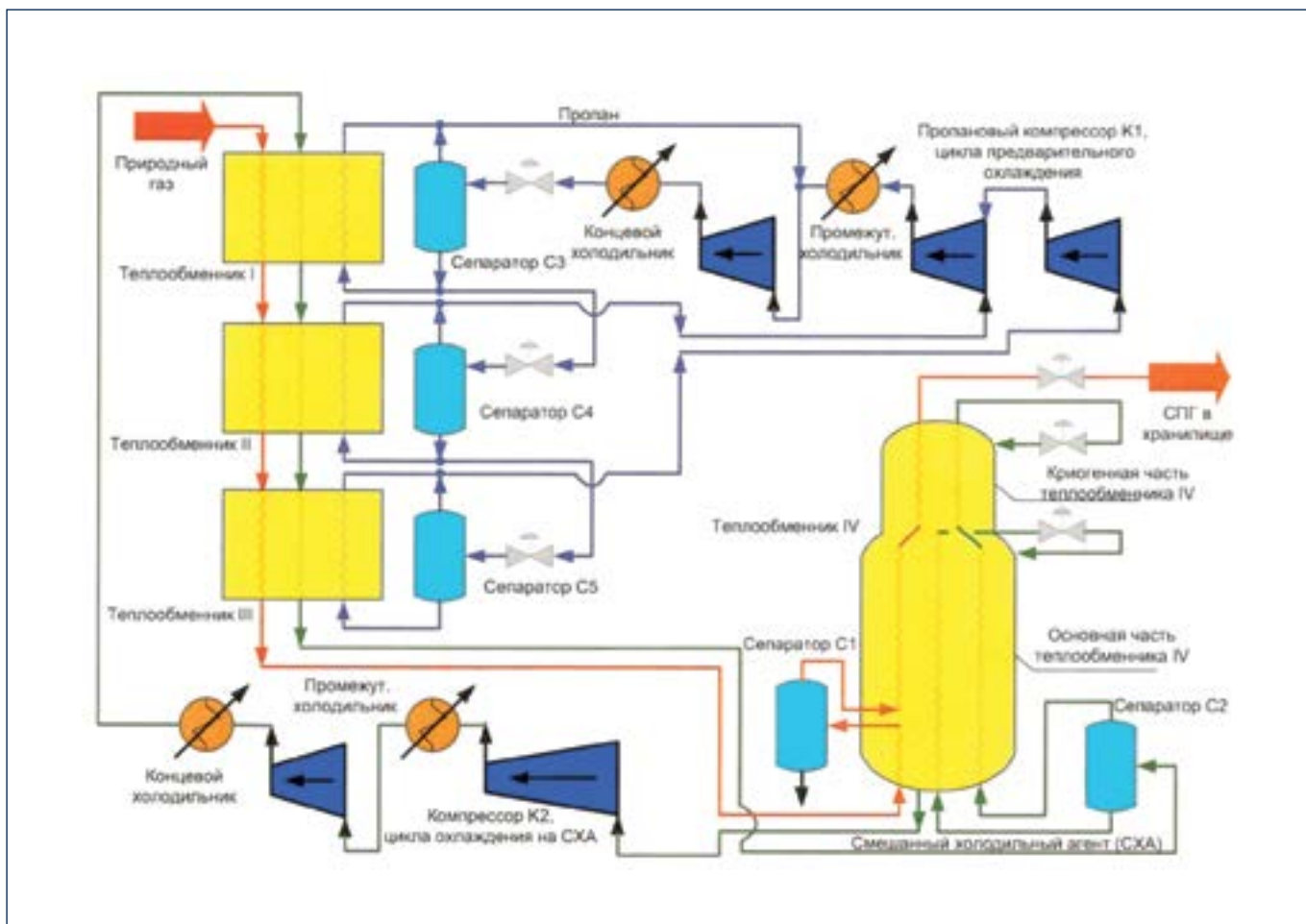


Рис. 2. Технологическая схема процесса C3MR [12]

Fig. 2. C3MR process diagram [12]

нием упрощенных моделей, при этом для перестроения фактической работы завода требуется гораздо меньше средств и времени.

Оптимизация технологических процессов заводов СПГ была рассмотрена в нескольких исследованиях с использованием различных [5–7] подходов, и в большинстве случаев получены хорошие результаты [8].

В качестве основного критерия оптимизации в процессе получения СПГ обычно используется себестоимость сжижения по данному технологическому процессу. Однако множество допустимых вариантов является очень большим, поэтому задача оптимизации технологии СПГ является весьма трудоемкой и сложной. Технолог физически не может спроектировать такое количество вариантов. Поэтому разработка технологических процессов сжижения носит субъективный характер, и качество спроектированных технологических процессов зависит от опыта и квалификации технолога, который их разработал. Поскольку от качества технологических процессов во многом зависит прибыль предприятия, задача разработки оптимальных технологий получения СПГ является весьма актуальной.

Для правильного выбора метода оптимизации необходимо знать свойства целевой функции и ее поведение в пространстве оптимизируемых переменных. Число переменных при оптимизации определяется числом регулируемых параметров в процессе сжижения и может достигать 15–20 и более. Для изучения свойств целевой функции широко используется метод покоординатного спуска.

Суть данного метода заключается в эквивалентной замене общей многопараметрической задачи поиска экстремума критерия последовательностью однопараметрических задач поиска частных экстремумов.

К достоинствам метода покоординатного спуска следует отнести возможность использования простых алгоритмов одномерной оптимизации. Таким образом, метод покоординатного спуска, по существу, представляет собой последовательное чередование одномер-

Таблица 1. Исходные данные для моделирования процессов SMR и C3MR

Table 1. Initial data for SMR and C3MR processes modelling

Параметры сырья Crude parameters	Значение Value
Температура, °C Temperature, °C	32
Давление, атм. Pressure, atm.	50
Состав, % _{mol} : Composition, % _{mol} : • метан (methane) • этан (ethane)	91,33 5,36
• пропан (propane) • и-бутан (i-butane) • н-бутан (n-butane) • и-пентан (i-pentane) • н-пентан (n-pentane) • азот (nitrogen)	2,14 0,46 0,47 0,01 0,01 0,22
Максимальная температура отходящей воды, °C Maximum temperature of outlet water, °C	40

Таблица 2. Параметры оптимизации и их границы для процесса SMR

Table 2. Optimization parameters and their limits for SMR process

Переменная Variable	Нижний уровень Minimum	Верхний уровень Maximum
Массовый расход азота, кг/ч Nitrogen mass flow, kg/h	0,1	0,6
Массовый расход метана, кг/ч Methane mass flow, kg/h	0,3	0,8
Массовый расход этана, кг/ч Ethane mass flow, kg/h	0,4	1,0
Массовый расход пропана, кг/ч Propane mass flow, kg/h	2,0	4,5
Перепад давления хладагента, атм. Coolant differential pressure, atm.	45	55
Температура хладагента при расширении, °C Coolant expansion temperature, °C	-150	-160
Цель оптимизации Optimization objective	Минимизация суммарной энергии на сжатие хладагента Minimization of total energy for coolant compression	

ных поисков вдоль всех координатных осей, но в итоге осуществляется многомерный поиск. В результате метод покоординатного спуска сводит задачу о нахождении наименьшего значения функции многих переменных к многократному решению одномерных задач оптимизации по каждому проектному параметру.

Оптимизация является одним из способов совершенствования эффективности в СПГ-технологии. Новизна подхода покоординатного спуска заключается в слиянии двух относительно простых методов оптимизации для решения сложной проблемы оптимизации тех-

нологий СПГ. Данная методология хорошо работает с процессами заводов СПГ, но не ограничивается ими и может быть использована для любой модели другого технологического процесса. Моделирование процесса завода СПГ возможно с использованием системы Aspen HYSYS. Термодинамические библиотеки и уравнения состояния, применяемые для расчетов в данном программном комплексе, подходят для реальных исследований технологических процессов. Рисунки 1 и 2 представляют упрощенную технологическую схему процесса SMR и C3MR соответственно.

Таблица 3. Параметры оптимизации и их границы для процесса СЗМР

Table 3. Optimization parameters and their limits for СЗМР process

Переменная Variable	Нижний уровень Minimum	Верхний уровень Maximum
Цикл смешанного хладагента Mixed coolant cycle		
Массовый расход азота, кг/ч Nitrogen mass flow, kg/h	0,0	0,3
Массовый расход метана, кг/ч Methane mass flow, kg/h	0,3	0,8
Массовый расход этана, кг/ч Ethane mass flow, kg/h	0,5	1,3
Массовый расход пропана, кг/ч Propane mass flow, kg/h	0,2	0,8
Давление на входе в компрессор, атм. Compressor inlet pressure, atm.	8	13
Давление на выходе из компрессора, атм. Compressor outlet pressure, atm.	50	55
Цикл пропана Propane cycle		
Первая ступень охлаждения, °С First cooling stage, °C	15	30
Вторая ступень охлаждения, °С Second cooling stage, °C	0	10
Третья ступень охлаждения, °С Third cooling stage, °C	-20	-5
Цель оптимизации Optimization objective	Минимизация суммарной энергии на сжатие пропана и смешанного хладагента Minimization of total energy for propane and mixed coolant compression	

Таблица 4. Результаты оптимизации процесса SMR

Table 4. SMR process optimization results

Свойство Property	Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2	Оптимизированный вариант Optimized option
Суммарная мощность компримирования, Вт Total compressing power, W	637,9	520,8	440,0
Удельная потребляемая мощность, кВт/т СПГ Specific power consumption, KW/t LNG.	688,2	561,9	474,7
Минимальный перепад температур в главном теплообменнике, °С Minimum differential temperature in main heat exchanger, °C	3,45	3,028	3,03
Массовый расход азота, кг/ч Nitrogen mass flow, kg/h	0,5	0,3	0,269
Массовый расход метана, кг/ч Methane mass flow, kg/h	0,8	0,7	0,529
Массовый расход этана, кг/ч Ethane mass flow, kg/h	0,8	0,6	0,619
Массовый расход пропана, кг/ч Propane mass flow, kg/h	4,0	3,5	2,847
Перепад давления хладагента, атм. Coolant differential pressure, atm.	52	47	48
Температура хладагента при расширении, °С Coolant expansion temperature, °C	-153	-156	-155

SMR и СЗМР – наиболее популярные технологии для моделирования ожижения природного газа. Рыночные условия привели к развитию ряда других модификаций этих базовых технологий, например, к использованию негорючего хладагента на основе N₂ и CO₂ [9], малых энергоэффективных циклов SMR [10] и т.д. Современная тенденция в промышленности СПГ включает в себя интеграцию процессов ожижения и технологий извлечения холода.

Исходные данные и допуски, используемые во время моделирования для обоих процессов, представлены в таблице 1. Расчет производился на обедненный газ с содержанием метана 91%. Сырье подается с максимальной температурой 32 °С и давлением 5 МПа. В качестве охлаждения используется вода.

В таблицах 2 и 3 приведены цели оптимизации, границы переменных и ограничения при проектировании для SMR- и СЗМР-процессов соответственно.

Некоторые ограничения при моделировании часто определяются физической природой процесса: например, мольная доля компонентов смешанного хладагента может изменяться только между 0 и 1 (данный параметр не указан в таблицах 2 и 3, но учитывается в модели как критерий поиска).

Основной целью оптимизации при сжижении природного газа в большинстве случаев является минимизация энергии компримирования [3,4,11]. Этот параметр наиболее важен, так как основные эксплуатационные расходы завода по сжижению связаны с потерями при сжатии и охлаждении.

В таблицах 4 и 5 представлены результаты оптимизации SMR- и СЗМР-процессов соответственно с использованием метода покоординатного спуска. Два базовых варианта и исследуемый метод оптимизации были рассмотрены для обоих процессов.

Вариант 1 задает избыточные значения переменных и, как видно из таблиц, не является оптимальным. Оптимизация переменных методом покоординатного спуска уменьшает удельную мощность сжатия примерно на 31% и 26% в процессах SMR и СЗМР соответственно. Таким образом, показано, что процессы имеют большое окно допустимых реше-

РОССИЯ, МОСКВА, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



НЕФТЕГАЗ



17-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

17–20 апреля 2017

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

При поддержке Министерства энергетики
Российской Федерации



Организаторы:



Реклама

12+

www.neftegaz-expo.ru



ний и оптимизация переменных может дать большой экономический результат.

Вариант 2 задает процесс с параметрами, подобранными с помощью опыта проектных решений. Однако и этот вариант можно улучшить с помощью метода покоординатного спуска путем оптимизации энергии, затрачиваемой на компримирование. Алгоритмом можно достичь до 15% и 14% экономии энергии для SMR- и СЗМР-процесса соответственно по сравнению со вторым вариантом реализации процессов. Высокая скорость потока хладагента с увеличенным содержанием высококипящего компонента (пропан) в SMR-процессе и увеличенная скорость обращения низкокипящих компонентов (азот) в процессе СЗМР являются основными причинами избыточного потребления энергии, которых удалось избежать с помощью алгоритма оптимизации. Повышенное соотношение давления между всасывающей и напорной линиями в узле сжатия является второй основной причиной высокого энергетического потребления.

Таким образом, использование алгоритма покоординатного спуска опирается на очень простой метод последовательного поиска локальных решений, и скорость оптимизации ограничивается только используемой памятью компьютера.

При этом уникальные характеристики метода помогают преодолеть проблему бесконечного времени (случайный поиск) и позволяет добиться результата в оптимальные сроки.

Таблица 5. Результаты оптимизации процесса СЗМР

Table 5. СЗМР process optimization results

Свойство Property	Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2	Оптимизированный вариант Optimized option
Суммарная мощность компримирования, Вт Total compressing power, W	360,2	308,7	262,9
Удельная потребляемая мощность, кВт/т СПГ Specific power consumption, KW/t LNG.	388,6	333,1	283,7
Минимальный перепад температур в главном теплообменнике, °C Minimum differential temperature in main heat exchanger, °C	3,150	3,150	3,015
Массовый расход азота, кг/ч Nitrogen mass flow, kg/h	0,30	0,20	0,09
Массовый расход метана, кг/ч Methane mass flow, kg/h	0,75	0,513	0,513
Массовый расход этана, кг/ч Ethane mass flow, kg/h	0,95	0,90	0,83
Массовый расход пропана, кг/ч Propane mass flow, kg/h	0,70	0,60	0,532
Давление на входе в компрессор, атм. Compressor inlet pressure, atm.	3,0	2,5	3,3
Давление на выходе из компрессора, атм. Compressor outlet pressure, atm.	55,0	54,0	50,0
Температура смешанного хладагента при расширении, °C Mixed coolant expansion temperature, °C	-136,5	-135,0	-133,4
Первая ступень пропанового охлаждения, °C First stage of propane cooling, °C	20,0	25	22,4
Вторая ступень пропанового охлаждения, °C Second stage of propane cooling, °C	3,5	4,5	4,0
Третья ступень пропанового охлаждения, °C Third stage of propane cooling, °C	-16,0	-12,0	-14,0

Литература (References):

- Lee U., Kim K., Han C. Design and optimization of multi-component organic Rankine cycle using liquefied natural gas cryogenic exergy. Energy 77(1), 2014, 520–532.
- Xia G., Sun Q., Cao X., Wang J., Yu Y., Wang L. Thermodynamic analysis and optimization of a solar-powered transcritical CO₂ (carbon dioxide) power cycle for reverse osmosis desalination based on the recovery of cryogenic energy of LNG (liquefied natural gas). Energy 66(1), 2014, 643–653.
- Lim Wonsub, Choi K., Moon I. Current status and perspectives of liquefied natural gas (LNG) plant design. Ind Eng Chem Res 52, 2013, 3065–3088.
- Del N.F., Kim J.K., Perry S., Smith R. Optimal design of mixed refrigerant cycles. Ind Eng Chem Res 47(22), 2008, 8724–8740.
- Mokarizadeh M., Shirazi H., Mowla D. Energy optimization for liquefaction process of natural gas in peak shaving plant. Energy 35(7), 2010, 2878–2888.
- Wahl P.E., Løvseth S.W., Mølnvik M.J. Optimization of a simple LNG process using sequential quadratic programming. Comp Chem Eng, 56, 2013, 27–36.
- Wang M., Khalilpour R., Abbas A. Operation optimization of propane precooled mixed refrigerant processes. J Nat Gas Sci Eng 15, 2013, 93–105.
- Soffiato M., Frangopoulos C.A., Manente G., Rech S., Lazzaretto A. Design optimization of ORC systems for waste heat recovery on board a LNG carrier. Energy Convers Manag 92, 2015, 523–534.
- Khan M.S., Lee S., Hasan M., Lee M.Y. Process knowledge based opportunistic optimization of the N₂-CO₂ expander cycle for the economic development of stranded offshore fields. J Nat Gas Sci Eng 18, 2014, 263–273.
- Khan M.S., Chaniago Y.D., Getu M., Lee M.Y. Energy saving opportunities in integrated NGL/LNG schemes exploiting: thermal-coupling common-utilities and process knowledge. Chem Eng Process Process Intensif 82, 2014, 54–64.
- Aspelund A., Gundersen T., Myklebust J., Nowak M.P., Tomasgard A. An optimization-simulation model for a simple LNG process. Comput Chem Eng, 34(10), 2010, 1606–1617.
- Meshcherin I.V. Alternative methods for gas transportation to markets and their diversification (In Russ.). Moscow, Gazprom VNIIGaz, 2011, 280 pp.