

Довгялло А.И., Крюкова Д.Е., Благин Е.В., Угланов Д.А.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КОМПЛЕКСАХ СПГ

Введение. В настоящее время всё большее применение природный газ находит в сжиженном состоянии (СПГ). Основным преимуществом использования газов в криогенно-сжиженном состоянии является удобство их хранения, а также транспортировки и потребления [1], в том числе и как моторного топлива для транспортных средств. Для накопления, хранения и выдачи криогенной жидкости в составе заправочных систем используют криогенные резервуары. Правильный подбор резервуара будет определять надежность и экономичность всей системы. При этом на одном из этапов использования сжиженных газов, которые хранятся обычно в специальных резервуарах, производится их регазификация. Регазификация происходит за счет тепла окружающей среды или специально подводимого тепла. Необходимо отметить, что на получение сжиженного криопродукта затрачивается определённое количество энергии (например, на 1 кг сжиженного природного газа затрачивается около 1 кВт·ч электроэнергии (рис. 1) [1]). Эта ранее затраченная энергия, как правило при регазификации безвозвратно теряется, поэтому её использование было бы целесообразным. Существует ряд способов использования данной низкопотенциальной энергии. В качестве примеров можно привести термоэлектрические преобразователи, которые используют температурный градиент между криопродуктом и окружающей средой [3], использование криопродукта в качестве хладагента в системах охлаждения в преобразователях энергии.

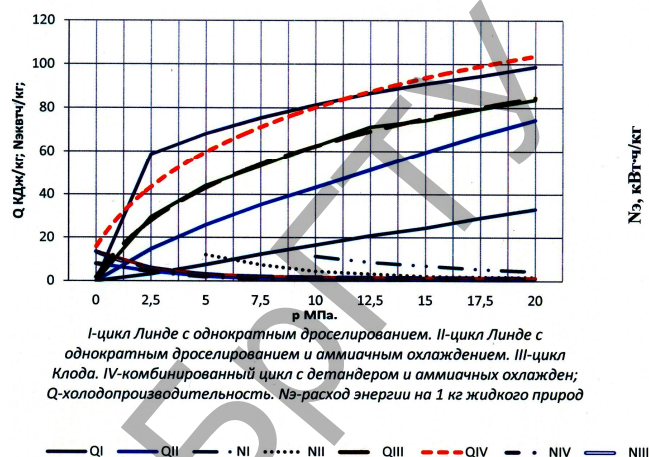


Рис. 1. Потребное количество холода и затраты энергии на сжижение 1 кг метана различными способами

В данной публикации рассматривается способ использования низкопотенциального тепла СПГ для получения дополнительной электроэнергии в установках регазификации сжиженного природного газа. При этом особенностью такой установки будет использование емкости с криогенной заправкой (БКЗ) [5]. СПГ после регазификации может быть, например, использован в качестве топлива для га-

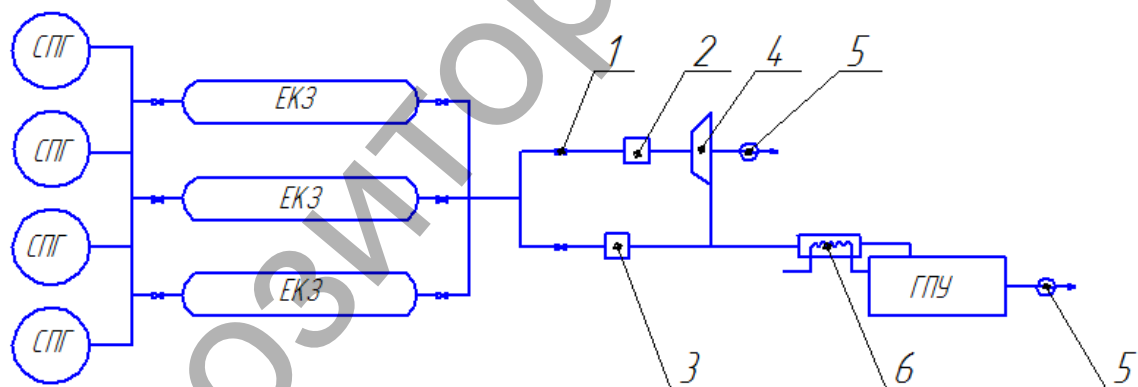


Рис. 2. Комплекс СПГ на основе емкостей с криогенной заправкой с возможностью утилизации низкопотенциального тепла

Довгялло Александр Иванович, д.т.н., профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. КОРОЛЕВА (Национальный исследовательский университет)".

Крюкова Дарья Евгеньевна, студентка Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. КОРОЛЕВА (Национальный исследовательский университет)".

Благин Евгений Валерьевич, инженер лаборатории энергосберегающих и энергоэффективных технологий научно-образовательного центра газодинамических исследований Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. КОРОЛЕВА (Национальный исследовательский университет)".

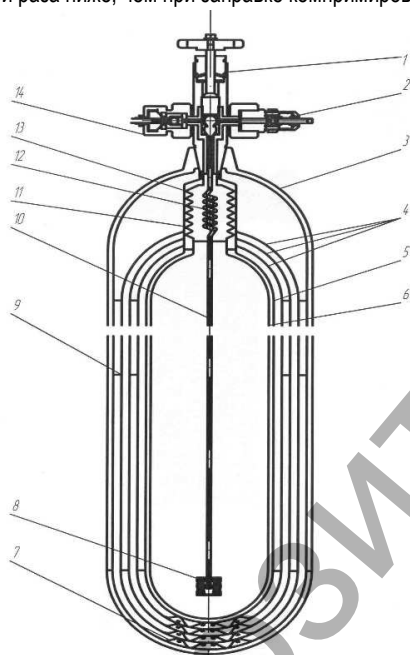
Угланов Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент, зав. лабораторией энергосберегающих и энергоэффективных технологий научно-образовательного центра газодинамических исследований Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. КОРОЛЕВА (Национальный исследовательский университет)".

Россия, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34.

запоршневой установки. Так как давление внутри емкости существенно выше необходимого давления на входе в газопоршневую установку (ГПУ), то существует возможность использования потенциала давления газифицированного СПГ для получения дополнительной энергии. Одним из вариантов использования этого потенциала является применения каскада расширительных турбин.

Описание установки. В состав предлагаемой установки входят криогенные резервуары низкого давления (РНД), емкости с криогенной заправкой (ЕКЗ) высокого давления, газовые редукторы, которые снижают давление до определенной величины, турбины, электрические генераторы и газопоршневая установка (рис. 2).

Особенностью емкости с криогенной заправкой является возможность её заправки как газом, так и криогенной жидкостью. Положенные в основу изобретения идеи заключаются в том, что в случае заправки баллона газообразным продуктом, он работает как обычный, а в случае заправки равным по массе криогенным компонентом, баллон работает в более благоприятных условиях по давлению (рис. 3). Кроме того, внутренняя «термосная» емкость для криогенного компонента и теплоизоляция предотвращают тепловые удары и смягчают условия по термоциклической прочности конструкции. Расчёты показывают, что циклы силового нагружения давлением такого баллона в три раза ниже, чем при заправке компримированием [3].



1 – вентиль запорный; 2 – клапан предохранительный; 3 – баллон; 4 – изоляция; 5 – изоляция внутренней емкости; 6 – внутренняя ёмкость; 7 – проставки опорные; 8 - фильтр; 9 – проставки радиальные; 10 – стакан; 11 – трубка заправочная; 12 – змеевик; 13 – сильфон; 14 – штуцер

Рис. 3. Емкость с криогенной заправкой

Принцип работы данной схемы состоит в следующем. Во внутренний объём (термос) ЕКЗ из РНД заправляется сжиженный природный газ при температуре 112 К. Далее он в емкости газифицируется за счет естественных теплопритоков или специальным образом до температуры окружающей среды 300 К и давления 30 МПа. После редуцирования, при определенных температуре и давлении, газ поступает в линию с комплексом расширительных турбин, на которых вырабатывается электрическая энергия. Далее газ используется в газопоршневой установке (ГПУ) в качестве моторного топлива.

Если в качестве ГПУ предлагается использовать газовую элек-

тростанцию FG Wilson PG1250В мощностью 1 МВт, которая оснащена газовым 4-тактным поршневым двигателем с жидкостной системой охлаждения, то расход топлива составляет 0,06 кг/с. Для ГПУ необходима подача газа под давлением около 0,1 МПа. Начальный запуск силовой установки предполагается только после полной газификации всех емкостей, в дальнейшем каждая емкость будет использоваться поочередно по своему циклу заполнения СПГ и регазификации. Как только первая емкость будет выработана, начинает работать вторая, в первую заливается жидкий метан из цистернохранилищ, и снова начинается процесс регазификации.

Оценка получения дополнительной энергии при регазификации сжиженного природного газа. В работе [6] был произведен расчет изменения параметров газа в емкости с криогенной заправкой при её опорожнении. В результате были получены зависимости изменения давления и температуры газа в емкости от времени (рис. 4).

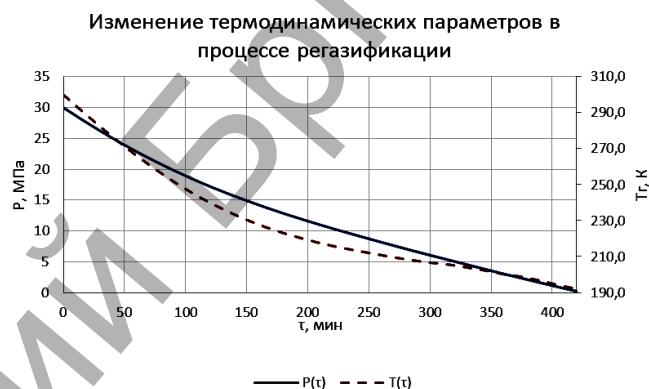


Рис. 4. Изменение температуры и давления в ЕКЗ параметров в процессе регазификации

Удельную работу турбины l_T (Дж/кг) можно определить по следующему соотношению:

$$l_T = c_{pr} T_r \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{k_r}} \right) \eta_T, \quad (1)$$

где c_{pr} – средняя изобарная теплоёмкость газа на входе в турбину, Дж/(кг·К); T_r – температура газа в емкости, °К; π_T – степень расширения в турбине; k_r – показатель изоэнтропы для газа; η_T – коэффициент полезного действия турбины.

Очевидно, что удельная работа турбины тем выше, чем больше степень расширения в турбине π_T .

Общая работа, совершаемая турбиной за время τ , будет равна

$$L_T = l_T \cdot G \cdot \tau,$$

где G – расход газа, поступающего из емкости; τ – время работы турбины (определяется как время от начала опорожнения до времени, когда давление газа в емкости достигнет величины, до которой редуцируется давление перед турбиной).

Соответственно, чем больше π_T , тем больше удельная работа, совершаемая турбиной, но тем меньше время её работы, и наоборот. Можно предположить наличие максимального значения выработанной дополнительной энергии с соответствующим оптимальным значением степени расширения π_T и соответствующим ей времени τ (рис. 5).

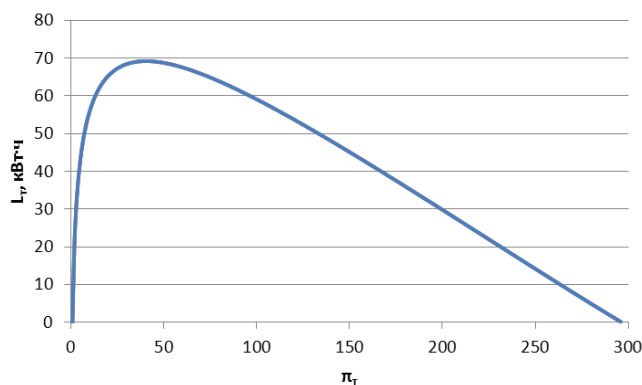


Рис. 5. Зависимость полученной работы от общей степени расширения

Таким образом, оптимальная общая степень расширения каскада турбин будет равна $\pi_{T_2} = 40,5$, а давление на входе в комплекс турбин – 4,05 МПа, величина полученной дополнительной энергии за время работы ёмкости – 69 кВт·ч.

Однако для более эффективного использования низкопотенциальной энергии можно установить несколько контуров турбин с газовыми редукторами, каждый из которых редуцирует давление газа до необходимой для каждой степени величины. Тогда с учётом изменения температуры газа в ёмкости в пределе максимально возможная энергия, которую можно получить, определяется следующим образом:

$$L_{max} = \int_{\tau} G \cdot c_{pr} T_r(\tau) \left(1 - \frac{1}{\pi_T(\tau)^{\frac{k_r-1}{k_r}}} \right) \eta_r d\tau$$

для данных условий эта величина составит 108 кВт·ч.

Для количественной оценки использования располагаемой дополнительной энергии предлагается использовать безразмерный показатель – коэффициент использования потенциала энергии, который будет представлять собой отношение полученной дополнительной энергии к максимально возможной:

$$k_{исп} = \frac{L_{конт}}{L_{max}}$$

Таким образом, для определения величины дополнительной энергии, которая может быть получена за счет регазификации сжиженного природного газа при использовании нескольких контуров турбин, можно воспользоваться следующей формулой:

$$L_{конт} = G \cdot \left[I_{T1} \cdot \tau_1 + \sum_{i=2}^n I_{Ti} \cdot (\tau_i - \tau_{i-1}) \right],$$

где n – число контуров; τ_i – время, за которое давление в емкости упадет до давления газового редуктора перед i -м контуром; I_{Ti} – удельная работа каскада турбин в i -м контуре.

Расчет был проведен для установок с числом контуров от 1 до 5 (таблица 1) с поиском оптимальных значений степени расширения для каждого контура.

Для энергетической оценки полезным также будет показатель, характеризующий долю возвращаемой энергии от той, что была затрачена на ожижение СПГ. Количество энергии, которое было ранее затрачено на ожижение СПГ, хранящегося в одной ЕКЗ, представляемой в данной системе топливоподачи, составит величину около $W_{СПГ} = 1200$ кВт·ч. Коэффициент возврата энергии можно рассчитать по следующей формуле:

$$k_в = \frac{L_{конт}}{W_{СПГ}}$$

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Несмотря на относительно невысокое значение $k_в$, стоит учитывать, что значительная доля низкопотенциального тепла теряется

при фазовом переходе природного газа из жидкого состояния в газообразное. Лучшей установкой была признана установка с 5 контурами каскадов турбин.

Схема такой установки представлена на рисунке 6. На схеме показаны давления (Мпа) после РНД и перепады давления на турбинах.

Таблица 1. Результаты расчета дополнительной энергии для различного числа контуров

Число контуров	Дополнительная энергия, кВт·ч	Коэффициент использования	Коэффициент возврата энергии, %
1	69	0,64	5,75
2	84,3	0,78	7,03
3	91,4	0,84	7,62
4	95,3	0,88	7,94
5	97,3	0,90	8,11

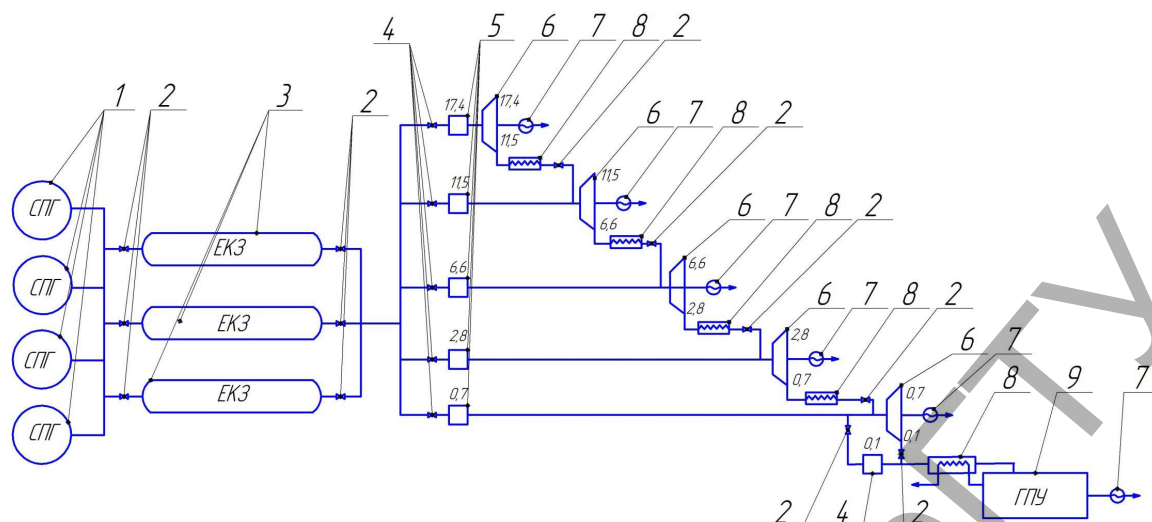
Заключение. В результате работы был выполнен анализ и проведены расчёты установки по получению дополнительной энергии при регазификации природного газа. Предложена методика определения оптимальных степеней расширения на турбинах и определено оптимальное число контуров турбин.

Показано, что при оптимизации установки с использованием расширительных турбин можно использовать энергетический теплоотрицательный потенциал СПГ на 90%, а доля возвращенной энергии от ранее затраченной на ожижение составляет величину порядка 8%.

Оптимальной была выбрана установка с пятью контурами турбин, которая позволяет при расходе газа 0,06 кг/с получить 97,3 кВт·ч энергии за 7 часов работы.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Бармин, И.В. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра [Текст] / И.В. Бармин, И.Д. Кунис; под ред. А.М. Архарова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 256 с.
- Довгялло, А.И. Использование баллона с криогенной заправкой в различных областях техники / А.И. Довгялло, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов, А.Б. Цапкова // Вестник Международной академии холода. – № 3. – 2014. – С. 30–34.
- Довгялло, А.И. Оценка термомеханической прочности в топливном баллоне с криогенной заправкой / А.И. Довгялло, Д.А. Угланов, Т.В. Ашихмина // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева. – 2007. – № 2. – С. 83–86.
- Бирюк, В.В. Оценка эффективности применения термоэлектрических генераторов в регазификаторах природного газа / В.В. Бирюк, А.И. Довгялло, А.А. Меркулов, Д.А. Угланов, Шиманов А.А. // Вестник СамГУПС. – 2013. – № 2. – С. 27–31.
- Пат. 2163690 Российская Федерация, МПК7 F17C9/02, F17T10/06. Топливный баллон [Текст] / Довгялло А.И., Лукачев С.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет. – № 99114577/06; заявл. 02.07.1977; опубл. 27.02.2001, Бюл. № 6. – 6 с.
- Крюкова, Д.Е. Повышение эффективности хранения, транспортировки и подачи сжиженного природного газа за счет использования емкости с криогенной заправкой. Магистерская диссертация / Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева (Национальный исследовательский университет), 2014.
- Довгялло, А.И. Оценка возможности применения теплоотрицательной энергии в комплексах сжиженного природного газа / А.И. Довгялло, А.А. Шиманов, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева. – 2013. – № 3. – С. 86–91.



1 – ёмкость со сжиженным природным газом; 2 – запорные вентили; 3 – ёмкость с криогенной заправкой; 4 – запорные вентили перед газовыми редукторами; 5 – газовые редукторы; 6 – турбины; 7 – электрогенераторы; 8 – подогреватели; 9 – газопоршневая установка

Рис. 6. Схема оптимизированной установки с пятью контурами турбин

Материал поступил в редакцию 15.03.15

DOVGYALLO A.I., KRYUKOVA D.E., BLAGIN E.V., UGLANOV D.A. Evaluation of the extra power generation possibility in LNG gasification plants

This article contains the information about extra power generation possibility in LNG complexes. LNG is gasified in a special tank and its pressure reached a value of 30 MPa. Potential energy of pressure was utilized one or several gas turbines. Expansion ratio optimum was found.