

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ

Использование холодопроизводящей способности СПГ при регазификации на воздухоразделительных установках

АВТОРЫ

Г.Н. Черкасов, Н.А. Лавров

ОРГАНИЗАЦИИ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, 2-я Бауманская улица, 5, стр. 4

СТРУКТУРИРОВАННАЯ АННОТАЦИЯ

Обоснование: Важной задачей в настоящее время является вопрос оптимизации схемных решений ВРУ с целью уменьшения либо стоимости установки, либо удельных затрат энергии на получение единицы продукта. А также все чаще поднимаются вопросы возможности полезного использования низкотемпературного потенциала СПГ в процессе его регазификации.

Цель: Целью работы является исследование возможности совмещения процессов регазификации и воздухоразделения, а также получение расчетных зависимостей, на основе которых можно сделать вывод о эффективности подобного решения в сравнении с традиционной схемой ВРУ.

Методы: В ходе работы в программной среде Nysys-14 были смоделированы три схемы ВРУ с различными вариантами включения потока СПГ, для которых приведены зависимости коэффициента извлечения азота и удельных затрат энергии от давления в цикле.

Результаты: Результаты расчётов показали, что затраты энергии на получение азота ниже в среднем на 59,75%, 50% и 46,75% соответственно для первой, второй и третьей схемы по сравнению с традиционной схемой ВРУ, а коэффициент извлечения выше в среднем соответственно на 55%, 45% и 72,5%.

Заключение: Исследование показало, что применение холодопроизводящей способности СПГ в технологической схеме ВРУ может значительно повысить коэффициент извлечения, уменьшить удельные затраты энергии на производство единицы продукта, а так же понизить стоимость установки. Рассмотрены преимущества и недостатки каждой схемы, а также предложены возможные области применения полученных результатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Воздухоразделительная установка, сжиженный природный газ, регазификация, жидкий азот.

TITLE

Using the refrigeration capacity of LNG in regasification at air separation plants

AUTHORS

Georgiy N. Cherkasov, Nikolai A. Lavrov

AFFILIATION

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, ext. ter. Basmanny municipal district, st. 2-ya Baumanskaya, 5, p. 1

ABSTRACT

BACKGROUND: An important task at present is the issue of optimizing the circuit solutions of the air separation plant in order to reduce either the cost of the installation or the specific energy costs per unit of product. Also, questions are increasingly being raised about the possibility of using the low-temperature potential of LNG in the process of its regasification.

AIMS: The purpose of the work is to study the possibility of combining the processes of regasification and air separation, as well as to obtain calculation dependencies, based on which it is possible to draw a conclusion about the efficiency of such a solution in comparison with the traditional circuit of the air distribution unit.

MATERIALS AND METHODS: In the course of work in the Hysys-14 software environment, three circuits of the air distribution plant with different options for switching on the LNG flow were simulated, for which the dependences of the nitrogen recovery factor and specific energy costs on the pressure in the cycle are given.

RESULTS: The calculation results showed that the energy costs for nitrogen production are lower by an average of 59.75%, 50% and 46.75%, respectively, for the first, second and third schemes compared to the traditional scheme of air separation plant, and the recovery factor is higher by an average of 55%, 45% and 72.5%, respectively.

CONCLUSIONS: The study showed that the use of LNG refrigeration capacity in the air separation plant process flow chart can significantly increase the recovery factor, reduce specific energy costs for the production of a unit of product, and also reduce the cost of the plant. The advantages and disadvantages of each scheme are considered, and possible areas of application of the obtained results are proposed.

KEYWORDS

Air separation plant, liquefied natural gas, regasification, liquid nitrogen.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время существенными темпами растет производство СПГ, который на большие расстояния экономически более выгодно транспортировать в жидком состоянии на морских судах – метановозах. В портовых терминалах СПГ переводится в газообразное состояние в газификаторах и выдается потребителю. По типу подвода теплоты газификаторы [1] классифицируются на: с водяным орошением, с погружной горелкой, атмосферные испарители и жидкостного типа. Холодопроизводящую способность СПГ так же можно использовать для выработки полезной энергии [2]. Японская компания Osaka Gas является первопроходцем в данной области, имея построенные криогенные электростанции, работающие по циклу Ренкина. Этой же компанией были предложены использование хладоресурса СПГ на воздухоразделительных установках и многие другие решения [3].

В данной работе рассмотрен способ регазификации, в котором холодопроизводящая способность СПГ используется для дополнительного охлаждения в криогенной воздухоразделительной установке (ВРУ) типа Аж для получения жидкого азота.

Разделение воздуха методом низкотемпературной ректификации в настоящее время является единственно возможным способом получения технических газов высокой чистоты в больших количествах, а так же жидких продуктов разделения воздуха. Схема азотной ВРУ с одной ректификационной колонной представлена в работе [4]. Воздух, сжатый в воздушных компрессорах и охлажденный в системе предварительного охлаждения, проходит очистку от влаги и углекислого газа в адсорберах и поступает в основной теплообменник блока разделения воздуха, в котором охлаждается за счет холода обратных потоков, дросселируется и вводится в ректификационную колонну концентрационного типа. Проходя вверх по колонне, воздух обогащается азотом и очищается от остальных высококипящих компонентов воздуха. В конденсаторе колонны газообразный азотный поток конденсируется за счет кипения кубовой жидкости с повышенным содержанием кислорода, находящейся при давлении меньшем, чем давление конденсации азота. В схеме так же используется турбодетандерный агрегат, предназначенный для получения дополнительной холодопроизводительности. Существуют разные варианты установки детандера в схеме ВРУ, например в нем может расширяться часть прямого потока воздуха, либо перегретые пары кубовой жидкости, выходящей из конденсатора. Для охлаждения прямого потока в основном теплообменнике используются пары кубовой жидкости, смешанные с газообразным азотом из переохладителя, а также производственный газообразный азот из колонны.

На современных ВРУ для получения азота, с одной концентрационной колонной, коэффициент извлечения азота может достигать 0.42 [5]. Если же рассмотреть вариант с получением на установке только жидких продуктов, коэффициент извлечения значительно снизится. Это обусловлено тем, что значительная часть полной холодопроизводительности [6]

$$Q_{Аж} = \left(\frac{G_A \cdot 1000}{M_A \cdot 3600} \right) \cdot (i_A - i_{Аж}) \quad (1)$$

(где G_A – массовый расход получаемого жидкого азота, M_A – молярная масса азота, i_A , $i_{Аж}$ – молярные энтальпии азота соответственно при начальных условиях и в жидком виде на выходе из установки), затрачивается на ожижение выводимых из ВРУ жидкостных продуктов. Если ВРУ работает в режиме выдачи продуктов в газообразном виде, то полная холодопроизводительность цикла большей частью затрачивается на компенсацию потерь вследствие несовершенства теплообмена (недорекуперации) в основном теплообменнике, теплопритоков из окружающей среды через теплоизоляцию, гидравлические и иные потери. Для установки Аж-1 [6] уравнение теплового баланса может быть записано в следующем виде:

$$\Delta i_{Тсж} + q_{пр.охл} + q_{дет} = Q_{Аж} + Q_{н.р.} + Q_{о.с.} + Q_{ут.дет.} + Q_{ут.комп.} + Q_{адс.} \quad (2)$$

В левой части выражения сумма составляющих теоретической холодопроизводительности установки – процессов, сопровождающихся понижением энтальпии: $\Delta i_{Тсж}$ – тепловой эффект дросселирования при изотермическом сжатии в компрессоре ниже линии инверсии, $q_{пр.охл}$ – теплота отводимая при предварительном охлаждении воздуха и $q_{дет}$ – отводимая работа при расширении части воздуха в детандере. В правой части стоит $Q_{Аж}$ – отводимая теплота для

получения жидких продуктов и сумма потерь: $Q_{н.р.}$ -потери вследствие недорекуперации в основном теплообменнике, $Q_{о.с.}$ теплоприток из окружающей среды, вследствие утечек в детандере $Q_{ут.дет.}$ и компрессоре $Q_{ут.комп.}$, и нагрева воздуха в адсорберах $Q_{адс.}$. Первые три слагаемых вносят самый значительный вклад в потери установки.

Данная схема была смоделирована в программной среде Nysys-14. По результатам расчета были построены графические зависимости коэффициента извлечения по жидкому азоту и удельные затраты мощности на получение 1 кг жидкого азота от давления в цикле - рис. 1. Очевидно, что при увеличении давления до величины давления инверсии воздуха, коэффициент извлечения будет повышаться, так как увеличивается тепловой эффект дросселирования и работа детандера. Но при этом и удельные затраты на получение жидкого азота так же возрастают. Поэтому для каждого случая в отдельности необходимо провести анализ и найти оптимум по используемому параметру.

В качестве внешнего источника дополнительной холодопроизводительности предлагается использование холодопроизводящей способности СПГ. За счёт этого увеличивается полная холодопроизводительность цикла и при одинаковых затратах энергии извлекается из установки больше жидкого азота. Рассмотрено три возможных варианта применения холодопроизводящей способности СПГ. Первый — непосредственное включение потока СПГ в основной теплообменник ВРУ, второй — использование дополнительного замкнутого контура с хладагентом R14 в качестве промежуточного хладоносителя и третий — получение на установке газообразного азота и сжижение его в теплообменнике с СПГ.

РЕГАЗИФИКАЦИЯ СПГ В ОСНОВНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ ВРУ

В данном случае в схеме отсутствует турбодетандер, что приводит к значительному упрощению и удешевлению процесса эксплуатации ВРУ, а также снижаются капитальные затраты. Вместо детандера для получения требуемой холодопроизводительности в цикле используется холодопроизводящая способность регазифицируемого СПГ — рис. 2. Благодаря этому можно не только компенсировать холодопроизводительность детандера, но даже увеличить полную холодопроизводительность, что приведет либо к дополнительному выходу жидких продуктов, либо к уменьшению затрат энергии на компримирование воздуха. Данная схема была смоделирована в программной среде Nysys-14. По результатам расчета были построены графические зависимости коэффициента извлечения установки по жидкому азоту и удельные затраты мощности на получение 1 кг жидкого азота от давления в цикле — рис.3. На графике видно, что с повышением давления темп увеличения коэффициента извлечения выше, чем скорость увеличения потребляемой мощности. Благодаря этому удельные затраты будут уменьшаться, а коэффициент извлечения установки повысится в среднем в 1,55 раза по сравнению с обычной азотной ВРУ.

РЕГАЗИФИКАЦИЯ СПГ В ТЕПЛООБМЕНЕ С R14

В схеме, представленной на рис.4 используется замкнутый контур с рабочим веществом R14 в качестве промежуточного хладоносителя. Отличительной особенностью данного хладагента является его низкая нормальная температура кипения 145 К и низкая температура плавления - 89,6 К. Хладагент R14 химически инертен, нетоксичен и негорюч. В дополнительном теплообменнике он охлаждается до 127 К за счёт газифицирования СПГ, далее направляется в циркуляционный насос и затем в основной теплообменник ВРУ для охлаждения сжатого воздуха. Данная схема так же была смоделирована в программной среде Nysys-14. По результатам расчета были построены графические зависимости коэффициента извлечения установки по жидкому азоту и удельные затраты мощности на получение 1 кг жидкого азота от давления в цикле - рис. 5. Цикл был рассчитан при значениях давления сжатого воздуха 32-36 бар, так как при меньших давлениях в основном теплообменнике будет наблюдаться температурная засечка из-за низкого значения водяного эквивалента прямого потока воздуха. Как видно, полученные значения коэффициента извлечения азота и удельных затрат энергии будут хуже, чем в первом рассматриваемом варианте вследствие потерь холода из-за

недорекуперации в дополнительном теплообменнике R14-СПГ. С другой стороны, эти величины будут лучше, чем в обычной установке без использования СПГ.

РЕГАЗИФИКАЦИЯ СПГ ПРОДУКЦИОННЫМ АЗОТОМ

В третьей схеме (рис.6) предлагается рассмотреть получение газообразного азота на установке А-1, а затем его ожижение в теплообменнике за счет газификации СПГ. Получаемый в цикле газообразный азот при давлении 6-7 бар направляется в дожимающие азотные компрессоры, где его давление повышается до 30 бар и затем поступает в дополнительный теплообменник, в котором сжижается за счет газификации СПГ. Затем жидкий азот направляется в переоохладитель, где охлаждается на 10-15К за счет дросселирования части собственного потока, и окончательно дросселируется до нормального давления. По результатам расчета в программной среде Nysys-14 были построены графические зависимости коэффициента извлечения установки по жидкому азоту и удельные затраты мощности на получение 1 кг жидкого азота от давления в цикле. Результаты представлены на рис. 7. Благодаря тому, что на установке получается азот в газообразном виде, коэффициент извлечения в данном варианте оказывается самым высоким, даже несмотря на то, что часть производственного жидкого азота используется для переохлаждения целевого потока.

ВЫВОДЫ

В конце стоит заметить, что рассматриваемые схемы относятся к установкам малой производительности. Для таких установок целесообразно работать над сокращением капитальных затрат, поэтому первые две схемы, в которых не требуется применение детандера и отсутствуют дополнительные азотные компрессора, являются наиболее предпочтительными. Обе этих схемы показали значительное увеличение коэффициента извлечения и уменьшение удельных затрат мощности в сравнении с обычной азотной ВРУ.

Так же следует отметить, что природный газ (ПГ) является отличным горючим и при регазификации СПГ необходимо прогнозировать случаи, связанные с появлением в воздухе недопустимой концентрации природного газа согласно ГОСТ 30852.19. В случае внештатной ситуации с аварией на основном теплообменнике, воздух из каналов высокого давления перетечет в каналы, где протекает СПГ, что может привести либо к пожару, либо взрыву. Для предотвращения подобных случаев рационально применение схем с промежуточным хладоносителем, либо с получением газообразного азота, в которых исключается возможный контакт СПГ с воздухом высокого давления в теплообменнике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен расчёт нескольких схем с применением хладоресурса СПГ для работы ВРУ, предназначенных для получения жидкого азота.

Результаты расчётов показали, что затраты энергии на получение азота ниже в среднем на 59,75%, 50% и 46,75% соответственно для первой, второй и третьей схемы по сравнению с традиционной схемой ВРУ с детандером, а коэффициент извлечения выше в среднем соответственно на 55%, 45% и 72,5%.

Из рассмотренных схем ВРУ с использованием хладоресурса СПГ наилучшей по энергетическим показателям следует считать первую схему с теплообменником-ожижителем азота, а по безопасности — вторую либо третью схему.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. Статья не имеет спонсорской поддержки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.

ВКЛАД АВТОРОВ. Оба автора внесли существенный вклад в формулирование проблемы, проведение расчетов и проверку статьи, прочли и одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

ADDITIONAL INFORMATION

FUNDING SOURCE. This article is not sponsored.

COMPETING INTERESTS. The author declares no transparent and potential conflicts of interest related to this article's publication.

AUTHOR'S CONTRIBUTION. Both authors made significant contributions to defining the problem, research, preparation of this article and read and approved the final version before publication.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пестич С.Д., Нефёдова М.А. Повышение безопасности при регазификации сжиженного природного газа. *ACADEMY*. 2018. №6 (33). С. 4-8. EDN URYVNZ;
2. Фальман А.Г., Агейский Д.Э. Перспективы регазификации СПГ. *Вестник МАХ*. 2015. №2. С. 46-49. EDN TVRHUP;
3. Toshiro Otsuka. Evolution of an LNG Terminal: Senboku Terminal of Osaka Gas. 23rd World gas conference; 2006; Amsterdam;
4. ОАО «Криогенмаш». Каталог. Криогенное оборудование. 2008. 54 С;
5. Громов А.Ф., Почуева Н.Н. Азотные и азотно-кислородные воздухоразделительные установки средней производительности нового поколения. *Технические газы*. 2009. №5. С. 32-41. EDN SCCNSL;
6. Архаров А.М., Архаров И.А., Беляков В.П., и др. Криогенные системы, том 2 — Москва: Машиностроение, 1999. EDN: XWGTEP.

REFERENCES

1. Pestich S.D., Nefedova M.A. Povysheniye bezopasnosti pri regazifikatsii szhizhennogo prirodnogo gaza. *Academy*. 2018; 6(33): 4-8. (In Russ). EDN URYVNZ;
2. Falman A.G., Ageysky D.E. LNG Regasification Prospects. *Vestnik max*. 2015; (2): 46-49. EDN TVRHUP;
3. Toshiro Otsuka. Evolution of an LNG Terminal: Senboku Terminal of Osaka Gas. 23rd World gas conference; 2006; Amsterdam;
4. JSC «Cryogenmash». Katalog. Kriogennoye oborudovaniye. 2008. 54 P. (In Russ);
5. Gromov A.F., Pochueva N.N. Nitric and nitric-oxygen air separation plants of average productivity of new generation. *Industrial gases*. 2009; (5): 32-41. EDN SCCNSL;
6. Arkharov A.M., Arkharov I.A., Belyakov V.P., et al. Cryogenic Systems. Moscow: Mechanical Engineering; 1999. EDN: XWGTEP.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за переписку	
*Черкасов Георгий Николаевич адрес: Россия, 105005, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1 ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3223-955X email: g.cherkasov@omzglobal.com телефон: 89321153234 eLibrary SPIN: 4340-6747	Georgiy N. Cherkasov address: 105005 M Russia Moscow, ext. ter. Basmanny municipal district, st. 2-ya Baumanskaya, 5, p. 1 ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3223-955X email: g.cherkasov@omzglobal.com Phone: 89321153234 eLibrary SPIN: 4340-6747
Лавров Николай Алексеевич д.т.н., профессор адрес: 105005, г. Москва, вн. тер. г.	Lavrov Nikolay Alekseevich Dr.Sc(Eng), professor address: 105005 M Russia Moscow, ext. ter.

муниципальный округ Басманный, ул. 2-я
Бауманская, д. 5, с. 1
телефон: +79035596471
email: 79035596471@yandex.ru,
lavrovna@bmstu.ru
eLibrary SPIN: 9187-7444
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2324-8247>

Basmanny municipal district, st. 2-ya
Baumanskaya, 5, p. 1
Phone: +79035596471
email: 79035596471@yandex.ru,
lavrovna@bmstu.ru
eLibrary SPIN: 9187-7444
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2324-8247>

Article in Press

РИСУНКИ

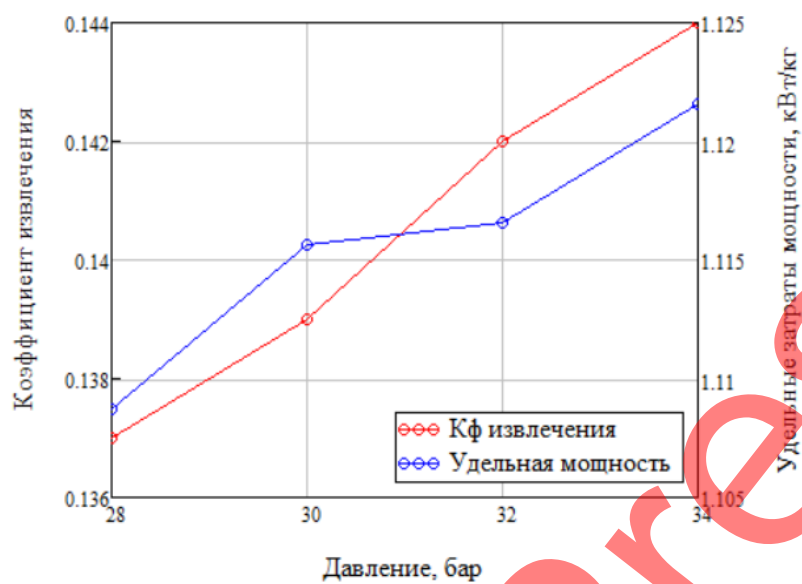


Рис.1. Результаты расчета. ВРУ Аж-1.

Figure 1. Calculation results. Air separation plant for 1000 kg/h liquid nitrogen.

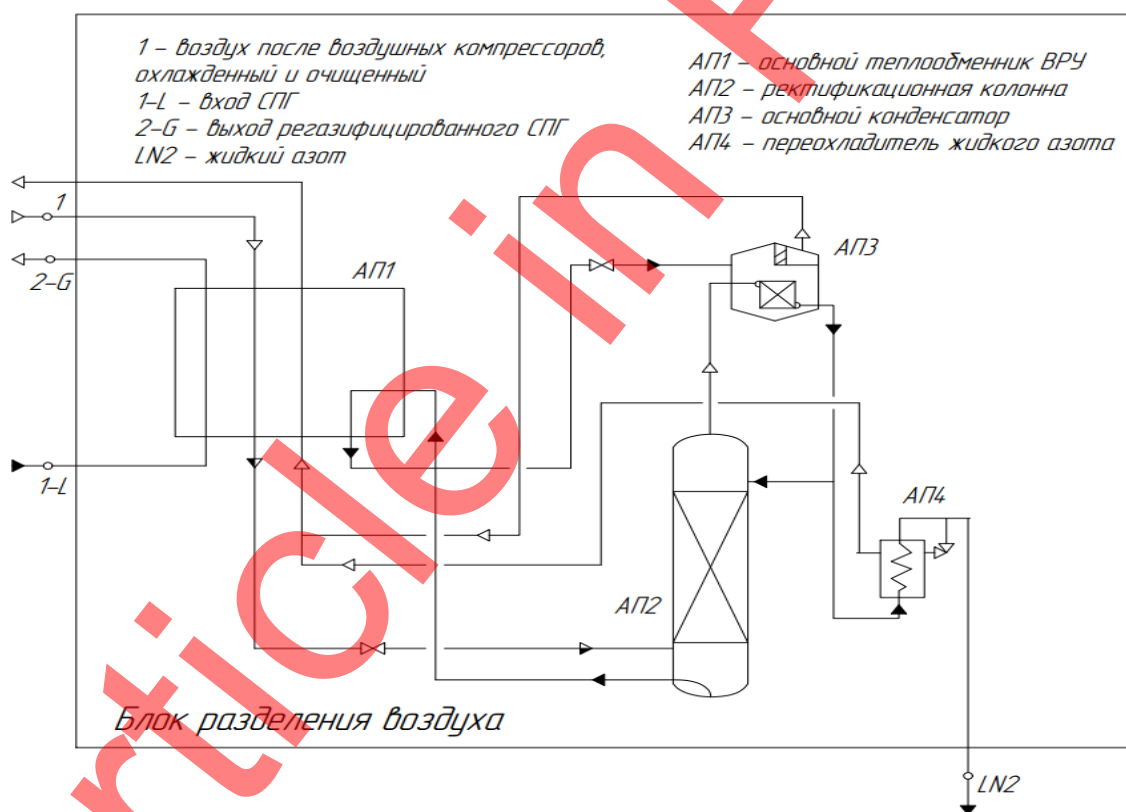


Рис. 2. Принципиальная схема ВРУ с использованием холодопроизводящей способности СПГ.

Figure 2. Schematic diagram of air separation plant with using refrigeration capacity of LNG.

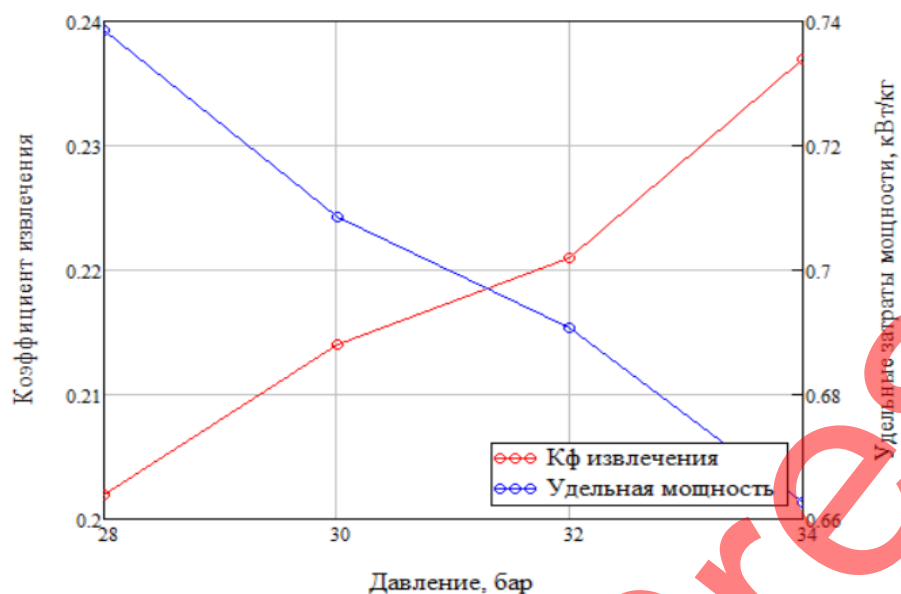


Рис.3. Результаты расчета. Регазификация СПГ в основном теплообменнике ВРУ.
Figure 3. Calculation results. LNG regasification in the main heat-exchanger of air separation plant.

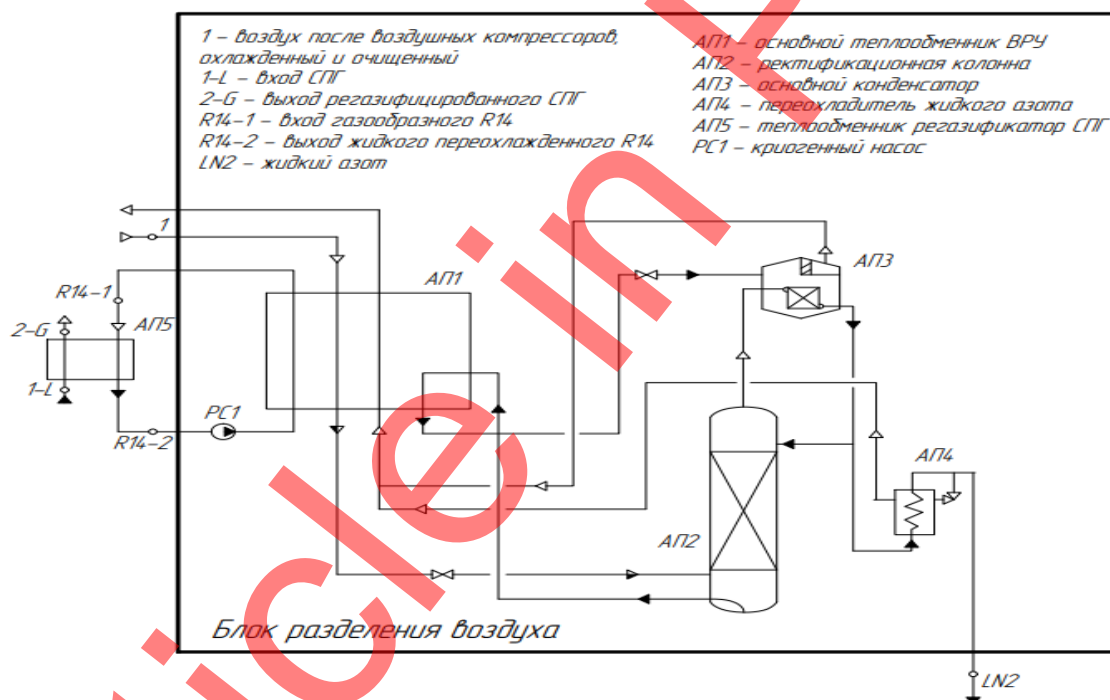


Рис. 4. Принципиальная схема ВРУ с дополнительным теплообменником-газификатором СПГ.
Figure 4. Schematic diagram of air separation plant with additional heat-exchanger for gasification LNG.

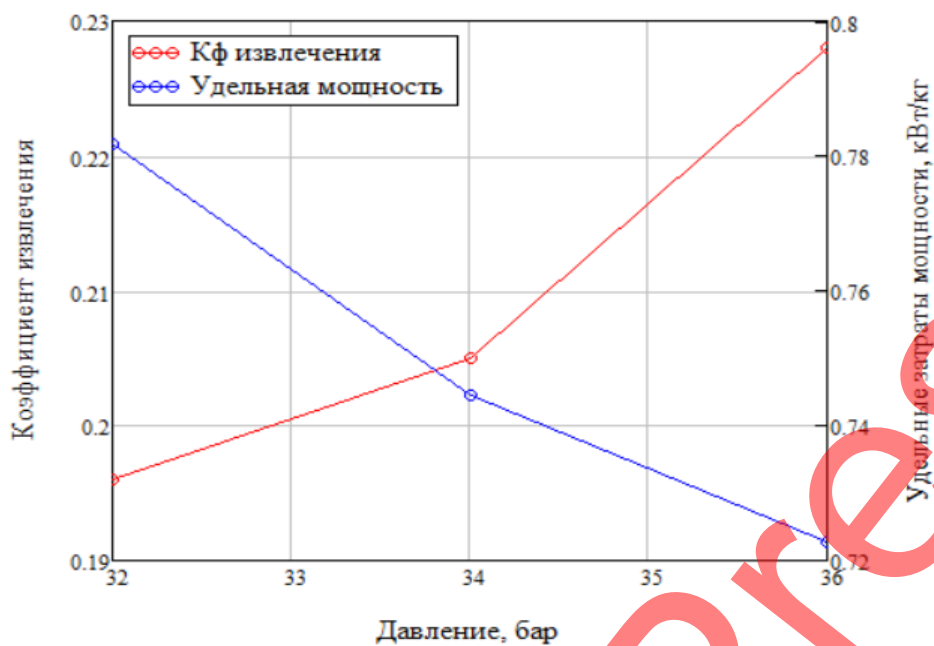


Рис. 5. Результаты расчета. Регазификация СПГ в дополнительном теплообменнике R14-СПГ.
Figure 5. Calculation results. LNG regasification in the additional heat-exchanger with R14.

АП6 – теплообменник-газификатор СПГ

АП7 – переохладитель жидкого азота

КА – компрессор азотный

1Ga – вход газообразного азота

1L – вход СПГ

2G – выход регазифицированного СПГ

GN2 – выход газообразного азота

LN2 – жидкий азот

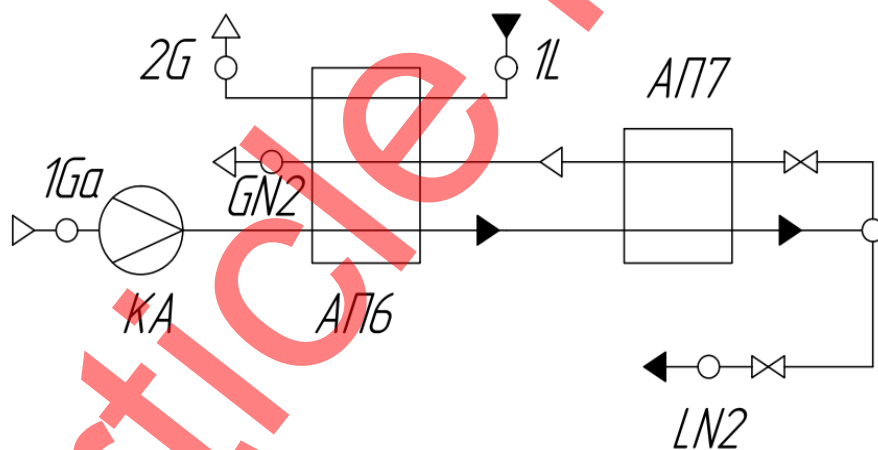


Рис. 6. Узел ожижения продукционного азота и газификации СПГ.
Figure 6. Unit for liquefaction of product nitrogen and gasification of LNG.

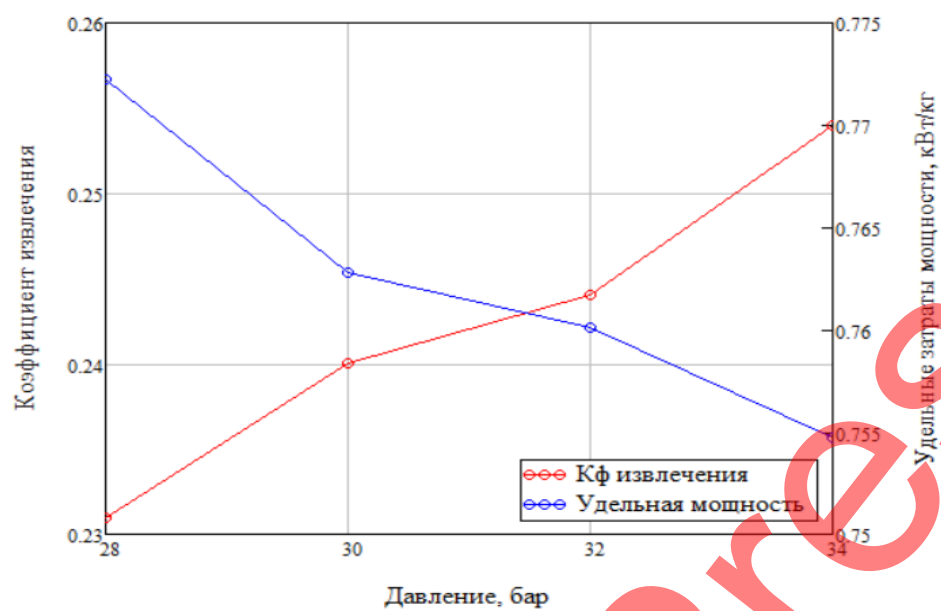


Рис. 7. Результаты расчета. ВРУ А-1 с ожижителем азота.

Figure 7. Calculation results. Air separation plant for 1000 Nm³/h nitrogen with heat-exchanger for liquefaction nitrogen.