

МНОГОМЕРНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

В рамках концепции интегрированных интеллектуальных энергетических систем в статье рассмотрен вариант многомерной интеграции в топливно-энергетический комплекс республики элементов газотранспортной системы. Авторами синтезирована и исследована технологическая схема комбинированной энерготехнологической установки с выработкой электроэнергии и последующим ее преобразованием в синтетический метан.



В.А. СЕДНИН,
д.т.н., профессор, заведующий
кафедрой «Промышленная
теплоэнергетика
и теплотехника» БНТУ

Интеграционные тенденции в мировой энергетике

Современные тенденции развития энергетики как инфраструктурной метасистемы предполагают более комплексный подход к взаимодействию между системами электро-, тепло-, газоснабжения, который учитывал бы возрастающую активность потребителей в управлении собственным энергоснабжением, появление новых типов накопителей энергии и прогрессивных информационно-телекоммуникационных технологий [1]. Неизбежное развитие распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), более активное использования атомной энергии и интеграция ВИЭ и АЭС в существующие централизованные топливно-энергетические комплексы требуют реализации новых принципов построения этих интеграционных образований. Одним из основных элементов энергосистемы в этом случае будет являться активный потребитель, обладающий возможностью маневрировать своим энергопотреблением и играющий важную роль в управлении спросом на энергоресурсы. В качестве связующего элемента, обеспечивающего интеграцию энергоисточников потребителя и централизованной энергосистемы, выступает энергетический хаб (энергетический узел) для преобразования, хранения и распределения различных видов энергии и энергоносителей. При этом сегодня появились новые возможности интеграции систем энергоснабжения в связи с развитием концепций Smart Grid, Smart Metering, Smart City и других инновационных технологий на базе тотальной цифровизации и интеллектуализации.

Интеграционные тенденции в мире представлены масштабным европейским проектом «Объединенные эффективные крупномасштабные интегрированные городские системы», который реализуется в крупных городах Европы. В нем принимают участие 64 города из 18 стран. В рамках проекта предусматриваются: интеграция систем электро-, тепло-, хладоснабжения; использование традиционных, возобновляемых и вторичных энергоресурсов; создание централизованных энергетических хабов с накопителями энергии; строительство объектов с «умным потребителем» и аккумулярованием энергии для сглаживания пиковой нагрузки [2, 3].



А.А. АБРАЗОВСКИЙ,
м.т.н., заведующий кафедрой
«Газоснабжение и местные виды
топлива» ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ»



П.Е. БУШКОВ,
инженер филиала «Гомельское
управление магистральных
газопроводов» ОАО «Газпром
трансгаз Беларусь»

Одним из инновационных направлений в рамках реализации парадигмы интегрированных интеллектуальных энергетических систем является применение концепции Power-to-Gas (PtG), сущность которой заключается в использовании излишков электрической энергии для производства водорода посредством электролиза воды. Теоретическое потребление электроэнергии на выработку 1 м³ водорода составляет 2,94 кВт·ч, эффективность производства в настоящее время – 48–70 %, соответственно, фактический расход для промышленных электролизеров – 4,5–5 кВт·ч [4]. Полученный водород может быть использован на топливные либо сырьевые нужды или же преобразован в другие углеводороды, такие как метан, метанол и пр. Динамика реализации PtG-проектов в Европейском союзе и их структура по виду конечного продукта представлены на рисунках 1, 2 [5].

Возможности реализации концепции Power-to-Gas на объектах системы газоснабжения Республики Беларусь

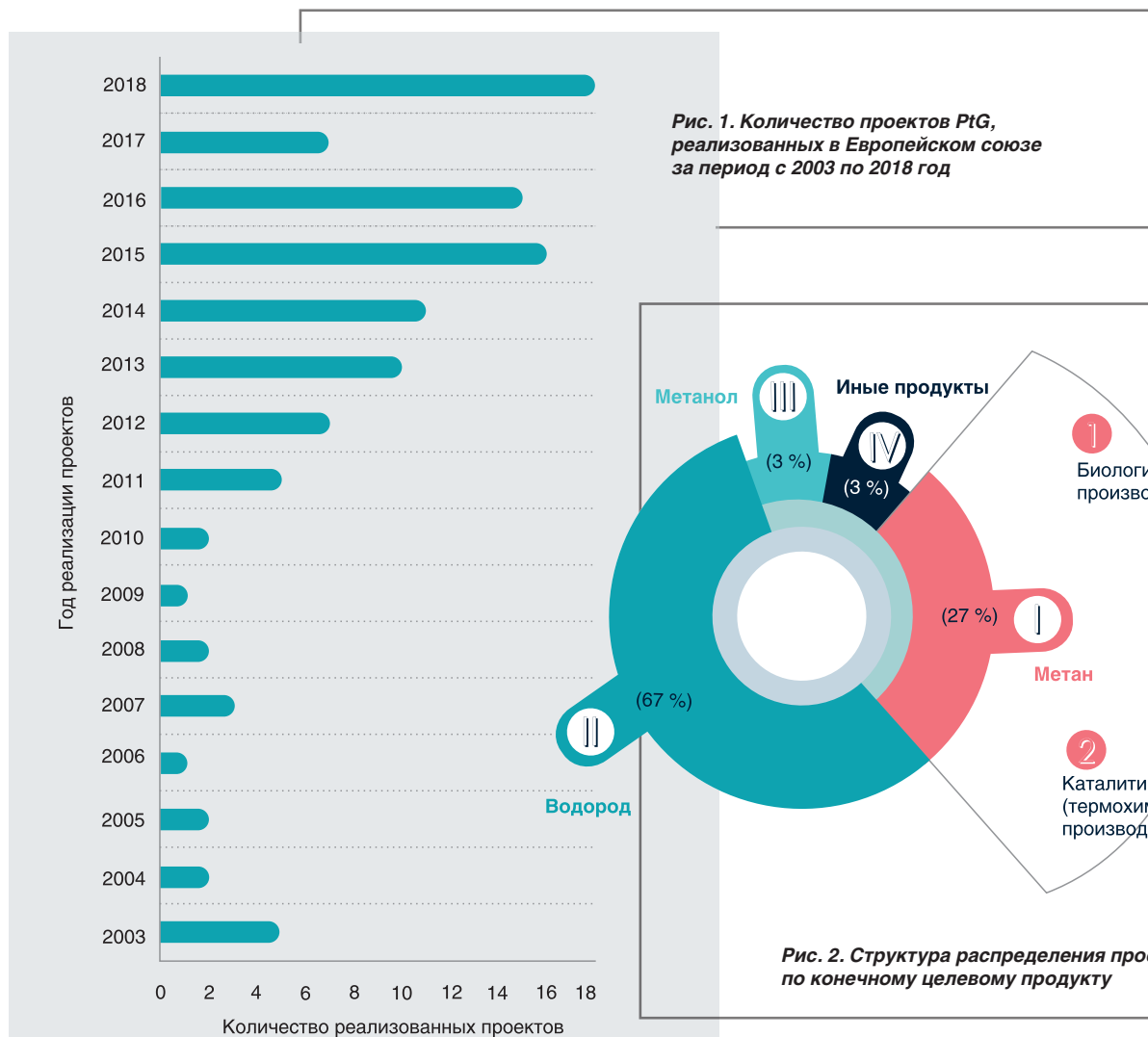
Республика Беларусь, являясь одной из самых газифицированных стран мира, располагает системой газоснабжения, производственный комплекс которой включает газотранспортную (протяженность магистральных газопроводов более 7,9 тыс. км) и газораспределительную (протяженность

газопроводов более 60 тыс. км) структуры, обеспечивающие подачу природного газа во все города и районные центры республики [6, 7]. Это может способствовать успешной реализации проекта PtG в стране.

Применение PtG-технологии позволит достичь более многомерной интеграции системы газоснабжения в топливно-энергетический комплекс республики за счет преобразования избыточной электроэнергии в синтетический метан, совместимый по своим характеристикам с природным газом. Процесс преобразования проходит в два этапа: производство H₂ путем электролиза воды и метанизация этим водородом CO₂ из внешнего источника в CH₄.

Таким образом, избыточная электроэнергия посредством электролиза и метанизации может быть преобразована в экономичный накопительный химический энергоноситель, для хранения и транспортировки которого могут использоваться существующие инфраструктурные объекты системы газоснабжения.

Современные эффективные PtG-установки, реализующие процесс метанизации, имеют эффективность 54 % – именно столько исходной электроэнергии преобразуется в метан [8]. В рамках европейского проекта HELMETH, который координировался немецким Технологическим институтом Карлсруэ, удалось увеличить эффективность преобразования электричества в метан до 76 % за счет объединения высокотемпературного электролиза и метанизации



в единый технологический процесс. Одним из основных преимуществ указанного процесса является оптимальное использование технологической теплоты, вырабатываемой при метанизации, для удовлетворения потребностей в теплоте для электролиза [9].

Технологическая схема комбинированной установки на базе компрессорной станции магистральных газопроводов с применением PtG-технологии

В работах [10–12] синтезированы и оптимизированы новые регенеративно-утилизационные схемы комбинированных энерготехнологических установок на базе компрессорных станций магистральных газопроводов.

Главной особенностью указанных схем является совмещение принципов внутреннего и внешнего энергоиспользования, что позволяет максимально задействовать потенциал вторичных энергетических ресурсов станций для генерирования электрической и тепловой энергии, не снижая надежности и энергоэффективности работы газоперекачивающих агрегатов.

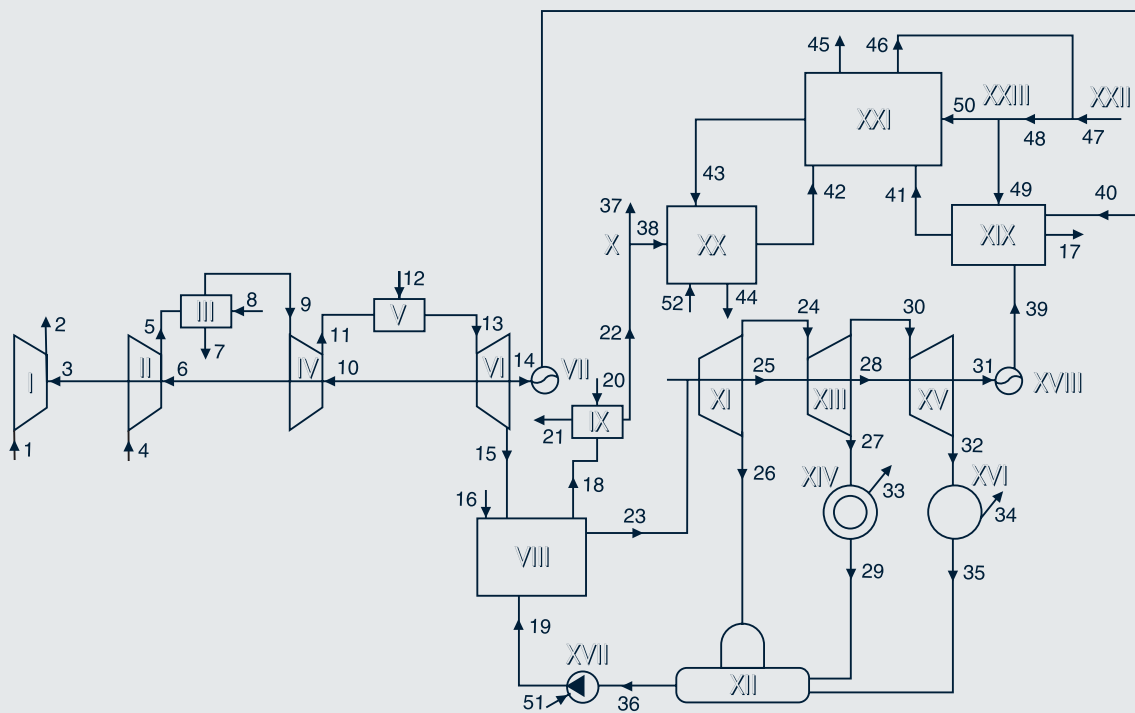
При осуществлении дальнейших исследований по данному направлению была разработана технологическая схема

комбинированной энерготехнологической установки на базе компрессорной станции магистральных газопроводов с применением PtG-технологии (рис. 3).

Увеличение давления транспортируемого природного газа осуществляется в центробежном нагнетателе (I) с приводным газотурбинным двигателем. Продукты сгорания после газовой турбины (VI) поступают в котел-утилизатор (VIII), в котором генерируется перегретый пар, необходимый для работы паровой турбины с регулируемыми отборами пара. Электроэнергия, вырабатываемая в генераторах (VII) и (XVIII), направляется в электролизер (XIX) для производства водорода. Часть продуктов сгорания после котла-утилизатора и охлаждения в теплообменном аппарате (IX) поступает на углекислотную станцию (XX), где посредством технологии абсорбции получается углекислый газ. В реакторе Сабатье (XXI) в результате экзотермической равновесной реакции водород и углекислый газ превращаются в метан и воду. Полученный в результате реакции синтетический метан может быть возвращен в магистральный газопровод либо использован в качестве топлива для газоперекачивающего агрегата.

Для параметрической оптимизации комбинированной энерготехнологической установки была разработана математическая модель макроуровня. При составлении системы балансовых уравнений было принято, что транспортные элементы

Рис. 3. Технологическая схема комбинированной энерготехнологической установки на базе газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода: I – нагнетатель; II, IV – воздушные компрессоры; III, IX – теплообменные аппараты; V – камера сгорания; VI – газовая турбина; VII, XVIII – электрогенераторы; VIII – котел-утилизатор; XI, XIII, XV – ступени паровой турбины; XII – деаэрактор; XIV – потребитель тепловой энергии; XVI – конденсатор; XVII – насос питательной воды; XIX – электролизер; XX – углекислотная станция; XXI – реактор Сабатье; 1, 2, 12, 16, 45 – природный газ; 4, 5, 9, 11 – воздух; 13, 15, 18, 22, 37, 38 – продукты сгорания; 17 – кислород; 23, 24, 26, 27, 30, 32 – пар; 29, 35 – конденсат; 19, 36, 43, 46–50 – вода; 41 – водород; 42 – углекислый газ; 44 – технологические отходы; 3, 6, 10, 14, 25, 28, 31 – механическая энергия; 33, 34 – тепловая энергия; 39, 40 – электрическая энергия.



(связи) являются идеальными, то есть в них отсутствуют энергетические и материальные потери. В технологических элементах материальные потери (утечки и присосы) также принимались нулевыми. Энергетические потери в транспортных элементах учитывались через коэффициенты потерь энергии в смежных технологических элементах.

Сокращенная система балансовых уравнений математической модели имеет следующий вид:

$$\begin{cases} G_4 \cdot h_4 - G_4 \cdot h_5 + \eta_2 \cdot N_6 = 0; \\ \eta_3 \cdot G_4 \cdot h_5 + G_7 \cdot h_7 - G_4 \cdot h_9 - G_7 \cdot h_8 = 0; \\ G_4 \cdot h_9 - G_4 \cdot h_{11} + \eta_4 \cdot N_{10} = 0; \\ G_{12} + G_4 - G_{13} = 0; \\ G_{12} \cdot h_{12} + \eta_5 \cdot G_4 \cdot h_{11} - G_{13} \cdot h_{13} = 0; \\ G_{13} \cdot h_{13} - G_{13} \cdot h_{15} - \frac{1}{\eta_6} \cdot (N_3 + N_6 + N_{10} + N_{14}) = 0; \\ N_{14} - \frac{1}{\eta_7} \cdot N_{40} = 0; \\ G_{13} + G_{16} - G_{18} = 0; \\ G_{13} \cdot h_{15} + \eta_8 \cdot G_{16} \cdot h_{16} + G_{36} \cdot h_{19} - G_{18} \cdot h_{18} - G_{36} \cdot h_{23} = 0; \\ \eta_9 \cdot G_{18} \cdot h_{18} + G_{20} \cdot h_{20} - G_{20} \cdot h_{21} - G_{18} \cdot h_{22} = 0; \\ G_{18} - G_{37} - G_{38} = 0; \\ G_{23} - G_{26} - G_{24} = 0; \\ G_{23} \cdot h_{23} - G_{24} \cdot h_{24} - G_{26} \cdot h_{26} - \frac{1}{\eta_{11}} \cdot N_{25} = 0; \\ G_{27} + G_{26} + G_{30} - G_{36} = 0; \\ G_{27} \cdot h_{29} + \eta_{12} \cdot G_{26} \cdot h_{26} + G_{30} \cdot h_{35} - G_{36} \cdot h_{36} = 0; \\ G_{24} - G_{30} - G_{27} = 0; \\ G_{24} \cdot h_{24} - G_{27} \cdot h_{27} - G_{30} \cdot h_{30} - \frac{1}{\eta_{13}} \cdot N_{28} = 0; \\ \eta_{14} \cdot G_{27} \cdot h_{27} - G_{27} \cdot h_{29} - N_{33} = 0; \\ G_{30} \cdot h_{30} - G_{30} \cdot h_{32} - \frac{1}{\eta_{15}} \cdot N_{31} = 0; \\ \eta_{16} \cdot G_{30} \cdot h_{32} - G_{30} \cdot h_{35} - N_{34} = 0; \\ N_{25} + N_{28} + N_{31} - \frac{1}{\eta_{18}} \cdot N_{39} = 0; \\ G_{49} - G_{17} - G_{41} = 0; \\ G_{49} \cdot h_{49} - G_{17} \cdot h_{17} - G_{41} \cdot h_{41} + \eta_{19} \cdot (N_{40} + N_{39}) = 0; \\ G_{38} + G_{50} - G_{44} - G_{42} = 0; \\ G_{38} \cdot h_{38} + G_{50} \cdot h_{43} - G_{44} \cdot h_{44} - \frac{1}{\eta_{20}} \cdot G_{42} \cdot h_{42} + N_{52} = 0; \\ G_{41} + G_{42} - G_{45} - G_{46} = 0; \\ \eta_{21} \cdot G_{41} \cdot h_{41} + G_{42} \cdot h_{42} + G_{50} \cdot h_{50} - G_{46} \cdot h_{46} - G_{50} \cdot h_{43} - G_{45} \cdot h_{45} = 0; \\ G_{46} + G_{47} - G_{48} = 0; \\ G_{48} - G_{49} - G_{50} = 0; \\ G_{41} = \frac{\rho_{H_2} \cdot (N_{39} + N_{40})}{k_{H_2} \cdot 3600}; \\ G_{49} = k_{H_2O} \cdot G_{41}; \\ G_{50} \cdot h_{50} - G_{50} \cdot h_{43} - N_c = 0, \end{cases}$$

где G_4 – расход воздуха, кг/с; $G_7, G_{20}, G_{36}, G_{37}, G_{38}, G_{46}, G_{47}, G_{48}, G_{49}, G_{50}$ – расход воды, кг/с; G_{12}, G_{16}, G_{45} – расход природного газа, кг/с; G_{13}, G_{18}, G_{38} – расход продуктов сгорания, кг/с; G_{42} – расход углекислого газа, кг/с; G_{41} – расход водорода, кг/с;

G_{44} – расход технологических отходов, кг/с; h_4, h_5, h_9, h_{11} – энтальпия воздуха, кДж/кг; $h_{13}, h_{15}, h_{18}, h_{22}$ – энтальпия продуктов сгорания, кДж/кг; h_{12}, h_{16}, h_{45} – энтальпия природного газа, кДж/кг; $h_7, h_8, h_{19}, h_{20}, h_{21}, h_{29}, h_{35}, h_{46}, h_{50}$ – энтальпия воды, кДж/кг; $h_{23}, h_{24}, h_{26}, h_{27}, h_{30}, h_{32}$ – энтальпия пара, кДж/кг; h_{42} – энтальпия углекислого газа, кДж/кг; h_{41} – энтальпия водорода, кДж/кг; h_{44} – энтальпия технологических отходов, кДж/кг; $N_3, N_6, N_{10}, N_{14}, N_{25}, N_{28}, N_{31}, N_{33}, N_{34}, N_{39}, N_{40}$ – мощность, кВт; k_{H_2} – коэффициент эффективности электролизера, η_i – коэффициент потерь в окружающую среду, отнесенный к i -му элементу.

Для проведения параметрической оптимизации в качестве критерия эффективности принята удельная выработка синтетического метана k_{CH_4} :

$$k_{CH_4} = \frac{G_{45}}{G_{тр.газ}}$$

где $G_{тр.газ}$ – расход транспортируемого природного газа, кг/с.

В качестве управляемых переменных принимались температура воздуха, поступающего в компрессор газотурбинного двигателя, T_4 и коэффициент эффективности электролизера k_{H_2} . Диапазоны их изменения составляют: $T_4 = 15 - 35$ °С; $k_{H_2} = 3 - 6$ кВт·ч/м³.

Основные результаты расчетов при расходе транспортируемого природного газа 233 кг/с (производительность действующего на компрессорных станциях газоперекачивающего агрегата) приведены на рисунке 4.

В исследуемой области максимальное значение коэффициента эффективности (удельная выработка метана) составляет $264 \cdot 10^{-6}$ при $T_4 = 15$ °С и $k_{H_2} = 3$ кВт·ч/м³. Наиболее существенное влияние на удельную выработку метана оказывает эффективность электролизера. Так, при $k_{H_2} = 4$ кВт·ч/м³ значение удельной выработки снижается до $198 \cdot 10^{-6}$.

Для анализа эффективности исследуемой установки на рисунке 5 приведена графическая зависимость выработки метана, отнесенной к расходу топливного природного газа, затрачиваемого на работу газоперекачивающего агрегата, от коэффициента эффективности электролизера и температуры воздуха. Максимальное значение указанной выработки составляет 0,064 при $T_4 = 15$ °С и $k_{H_2} = 3$ кВт·ч/м³. То есть при оптимальных значениях выбранных параметров количество вырабатываемого синтетического метана составляет 6,4 % от расхода топливного природного газа, а с учетом эффективности действующих электролизеров – снижается до 5 %.

Синтезированная технологическая схема комбинированной энерготехнологической установки на базе газоперекачивающего агрегата компрессорной станции с применением PtG-технологии позволяет замкнуть тепловые отходы на генерацию электрической энергии с ее преобразованием в синтетический метан, объем которого составляет около 5 % от расхода топливного природного газа в приводном газотурбинном двигателе.

Заключение

1. В рамках реализации парадигмы интегрированных интеллектуальных энергетических систем перспективным направлением является применение концепции Power-

to-Gas, предполагающей использование излишков электрической энергии для производства водорода посредством электролиза воды.

2. В условиях Республики Беларусь применение PtG-технологии позволяет достичь более многомерной интеграции системы газоснабжения в топливно-энергетический комплекс путем преобразования избытка электрической энергии в синтетический метан, совместимый по своим характеристикам с природным газом.

3. На базе схемы компрессорной станции магистрального газопровода разработана технологическая схема комбинированной установки с выработкой электроэнергии и преобразованием ее в водород и/или синтетический метан. Применение указанной установки позволяет производить синтетический метан в объеме около 5 % от объема топливного газа, затрачиваемого на привод газоперекачивающего агрегата.

Список литературы

1. Воропай, Н.И. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы / Н.И. Воропай, В.А. Стеников // Известия Академии наук. Энергетика. – 2014. – № 1. – С. 64–73.
2. The Marketplace of the European Innovation Partnership on Smart Cities and Communities [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eu-smartcities.eu/>. – Дата доступа: 05.04.2019.
3. System integration [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://celsiuscity.eu/Category/system-integration/>. – Дата доступа: 05.04.2019.
4. Mamoon, R. Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis / R. Mamoon, N. Hamid, D. Mohd // International Journal of Engineering and Advance Technology. – 2015. – Vol. 4. – P. 80–93.
5. Wulf, C. Review of power-to-gas projects in Europe / C. Wulf, J. Linben, P. Zapp // Energy Procedia. – 2018. – Vol. 15. – P. 367–378.
6. О компании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.btg.by/about/>. – Дата доступа: 04.04.2019.
7. Газификация потребителей Республики Беларусь на современном этапе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://belmingaz.by/news/gazifikacija_potrebitelej_respubliki_bielarus_na_sovremennom_ehtape/2018-04-06-40/. – Дата доступа: 05.04.2019.
8. Ученым удалось радикально повысить КПД технологии преобразования электричества в газ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rener.ru/scientists-managed-to-radically-improve-the-efficiency-of-power-to-gas-technology/>. – Дата доступа: 05.04.2019.
9. Methanation process [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.helmeth.eu/index.php/technologies/methanation-process/>. – Дата доступа: 05.04.2019.
10. Несенчук, А.П. Влияние теплоутилизационного «хвоста» компрессорной станции на эффективность работы газотурбинного привода с изобарным подводом теплоты и регенеративным теплоиспользованием / А.П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – № 4. – С. 37–46.

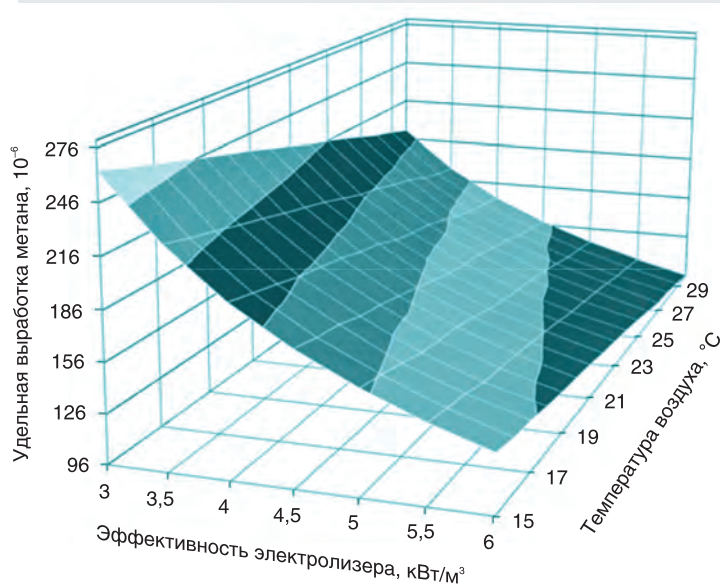


Рис. 4. Зависимость удельной выработки синтетического метана от температуры воздуха и эффективности электролизера

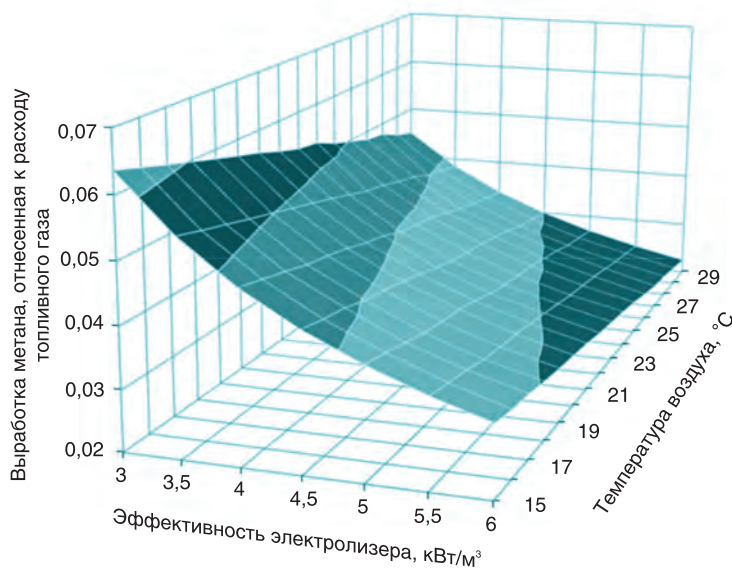


Рис. 5. Зависимость выработки синтетического метана, отнесенной к расходу топливного газа, от температуры воздуха и эффективности электролизера

11. Седнин, В.А. Повышение эффективности газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В.А. Седнин, А.А. Абрамовский // Энергия и менеджмент. – 2015. – № 6. – С. 14–16.
12. Седнин, В.А. Применение паросиловой установки для повышения энергоэффективности работы газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В.А. Седнин, А.А. Абрамовский // Энергия и менеджмент. – 2016. – № 2. – С. 16–19.