Энергосбережение и энергоэффективность

УДК 622.691.4

© В. К. Аверьянов, советник генерального директора
(АО «Газпром промгаз»)

© О. А. Давыдов, заместитель генерального
директора по капитальному строительству
и инвестициям
(ООО «Газпром межрегионгаз»)

© А. Н. Блинов, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник,
главный специалист
(АО «Газпром промгаз»)

© С. М. Анисимов, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: V.Averyanov@spb.oao-promgaz.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-16-2-122-130

© V. K. Averyanov, Advisor to the Director General
(JSC "Gazprom Promgaz")

© O. A. Davydov, Deputy CEO for capital construction
and investments
(LLC "Gazprom Mezhrregiongaz")

© A. N. Blinov, PhD in Sci. Tech., senior research worker,
chief specialist
(JSC "Gazprom Promgaz")

© S. M. Anisimov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: V.Averyanov@spb.oao-promgaz.ru

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ENERGY SYSTEMS FOR GAS DISTRIBUTION STATIONS

Представлены результаты анализа исследований по совершенствованию схемных решений энергетических систем газораспределительных станций, применению турбодетандеров, тепловых насосов, процессов квазиизотермического истечения газов при дросселировании. Приведены данные расчета параметров природного газа при различных термодинамических процессах, реализуемых в вышеуказанных видах оборудования. Определены параметры в реальных процессах дросселирования природного газа в вихревой трубе с потребителем холода. Выявлены перспективы использования потенциальной энергии давления магистральных газопроводов и возобновляемых источников энергии для получения дополнительных видов энергии и товарной продукции.

Ключевые слова: газораспределительная станция, возобновляемые источники энергии, турбодетандер, тепловой насос, дросселирование.

The article presents the results of the analysis of the study aimed at improving the circuit design of the power systems of gas distribution stations, the use of turboexpanders, heat pumps, processes of quasi-isothermal gas flow during throttling. The data for calculating the natural gas parameters at various thermodynamic processes implemented in the above mentioned types of equipment are given. Parameters in real processes of natural gas throttling in a vortex tube with a cold consumer are determined. The prospects of using the potential energy of pressure of gas pipelines and renewable energy sources to obtain additional types of energy and commercial products are identified.

Keywords: gas distribution station, renewable energy sources, turboexpander, heat pump, throttling.

Мировая энергетика в настоящее время определяет [1] тенденции создания энергетических систем нового поколения, связанные с требованиями энергоэффективности, минимизации количества отходов и безотходного производства.

Основными индикаторами развития здесь являются:

- показатели снижения удельного расхода энергии и ресурсов на стадиях добычи, транспортировки и распределения топлива;

- энергетическая эффективность генерации, транспортировки и использования различных видов энергии;

- темпы перехода на малоуглеродные и безуглеродные более экологически чистые технологии получения энергии.

Вышеизложенное направление развития определяет тенденции [2–8, 25] создания энергокомплексов для получения различных видов энергии и сопутствующих продуктов с интеллектуальной системой управления генерацией, передачей и потреблением энергии, а также разработки новых экологически более чистых энергоэффективных технологий.

В настоящее время на объектах ПАО «Газпром» эксплуатируется более 4 тыс. газораспределительных станций (ГРС). Существующие технические и технологические решения по ГРС Единой системы газоснабжения базируются [9] в большинстве на принципах, заложенных на этапе формирования отрасли. Развернутые в последние годы работы, направленные на оптимизацию затрат и повышение экономической эффективности систем газоснабжения, сделали актуальным вопрос совершенствования подходов при проектировании, строительстве и эксплуатации ГРС [2, 3, 10–17, 25 и др.]. Цитируемые работы посвящены вопросам совершенствования схемных решений энергетических систем ГРС, применению турбодетандеров, тепловых насосов, исследованию процессов квазиизотермического истечения газов при дросселировании и др.

В связи с развитием работ по использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для автономного энергоснабжения [6, 8] стали актуальными вопросы их применения в системах газоснабжения. Применительно к ГРС схемные решения использования потенциала ВИЭ рассмотрены в исследованиях [18, 19]. В работе [2] предложен комплексный подход к энерго- и ресурсоснабжению ГРС, получающий свое развитие в программе ПАО «Газпром» по внедрению турбодетандерных установок на ГРС для получения сжиженного природного газа и для выработки электроэнергии¹, а также в формируемой [9]

в ПАО «Газпром» программе создания автоматизированных газораспределительных станций нового поколения, отвечающих в итоге таким основным требованиям, как:

- электроснабжение от источника, расположенного на территории ГРС и использующего принцип преобразования энергии сжатого (транспортируемого) газа и/или возобновляемые источники энергии;

- применение алгоритмов управления энергокомплексом ГРС, имеющих функции оптимизации, прогнозирования изменений режима работы и самообучения;

- применение технологий, исключающих постоянное присутствие обслуживающего персонала на ГРС, использование газа в качестве топлива для подогрева транспортируемого газа.

С принятием в России законодательных и организационных мер по стимулированию развития цифровой экономики и энергетики существенно активизируются работы по интеллектуализации инженерной инфраструктуры, в том числе для вдольтрассовых потребителей газоснабжения [9, 20, 25].

В свете изложенного актуальной является оптимизация системы энергоснабжения ГРС с использованием энергоустановок на основе возобновляемых и нетрадиционных видов энергии, разработка на основе этого схемных решений и алгоритмов управления технологически связанными энергетическими элементами и системами, имеющими функции прогнозирования изменений режимов работы объекта и прихода энергии от возобновляемых источников и систем управления спросом на тепловую и электрическую энергию ГРС.

В вышеизложенной постановке требования к ГРС, перечень возможной продукции, потребляемой и поставляемой ГРС, можно представить в виде схемы (рис. 1).

Как известно, особенность ГРС связана с наличием потенциальной энергии давления газа, поступающего на станцию. В настоящее время существует несколько способов преобразования потенциала избыточного давления газа в различные виды энергии и продукты [2–4, 10–15]. Наибольшее число исследований посвящено использованию полезной мощности турбодетандерных установок на ГРС для производства электроэнергии

¹ Программа по внедрению турбодетандерных установок на ГРС для получения сжиженного природного газа и для выработки электроэнергии (утв. заместителем председателя правления ПАО «Газпром» В. А. Маркеловым, от 22.03.2016 № 03-42).

Рис. 1. Комплексное техническое решение по энергокомплексу ГРП (CAU — система автоматизированного управления; СПГ — сжиженный природный газ)

и холода [3, 10–15, 18, 19, 21, 24, 26 и др.]. Однако достаточного применения детандерные установки пока не получили, несмотря на их эффективность, из-за недостаточно комплексного подхода при их использовании и проблем подготовки газа (осушка, очистка и нагрев газа).

В зависимости от существующего перепада давления газа, наличия потребителей, назначения и соответствующего схемного решения возможно получение одного или нескольких компонентов: электрической энергии, холода, сжиженного природного газа. Сопутствующими (вторичными) товарами здесь могут быть получены: лед, вода и др. Выбор конкретной схемы включения турбодетандера индивидуален и зависит от формируемых на стадии проектирования условий работы ГРП (условий электро-, теплоснабжения, наличия потребителей тепловой и электрической энергии, холода, льда, сжиженного природного газа и др.).

Вариантами использования на ГРП потенциальной энергии газа в порядке значимости и возможности получения дополнительного продукта или энергии являются:

- обеспечение температурных показателей природного газа в технологических газопроводах ГРП и природного газа на выходе;
- получение электроэнергии (при превышении температурой природного газа на входе в ГРП требуемого значения на выходе);
- получение сжиженного природного газа;
- обеспечение холодоснабжения.

Рассмотрим изменение параметров газа при различных термодинамических процессах на конкретном примере. Результаты расчетов приведены в таблице и графически изображены на рис. 2.

При идеальном изотермическом процессе расширения природного газа, поступающего на ГРП с параметрами $P_0 = 6,0$ МПа, температурой $T_0 = 300$ К, до давления P_2 (процесс 0–1 на рис. 2) требуется подведение тепловой энергии из внешних источников $Q = 238,49$ кДж/кг.

Идеальный процесс дросселирования, происходящий при постоянной энтальпии $h_0 = \text{const}$ (процесс 0–2 на рис. 2), показывает, что температура газа в точке 2 всегда ниже начальной T_0 . В нашем случае $\Delta T = 21,8$ К, что потребует нагрева природного газа при выходе из ГРП.

Изменение параметров газа при различных процессах

№ п/п	Процесс	Точки	T , К	P , МПа	h , кДж/кг	S , кДж/(кг · К)	Δh , кДж/кг
Идеальные процессы	$T = \text{const}$	Начальная	300,0	6,0	567,10	9,353	-238,49
	Процесс 0-1	Конечная		1,2	617,12	10,315	
	$h = \text{const}$	Начальная	300,0	6,0	567,12	9,353	0
	Процесс 0-2	Конечная	278,17	1,2		10,142	
	$S = \text{const}$	Начальная	300,0	6,0	567,12	9,353	185,22
	Процесс 0-3	Конечная	196,4	1,2	381,88		
Реальные процессы	ДГУ с КПД = 0,8	Начальная	300,0	6,0	567,12	9,353	148,176
	Процесс 0-4	Конечная	212,2	1,2	418,24	9,532	
	Вихревая труба	Начальная	300	6,0	567,12	9,353	30,26
	Процесс 0-5	Конечная	264,86	1,2	536,86	10,028	
	Вихревая труба	Начальная	300	6,0	567,12	9,353	72,11
	с хладопотребителем. Процесс 0-6	Конечная	309,5	1,2	639,23	10,393	

Идеальный адиабатический (изоэнтропийный) процесс 0-3 сопровождается совершением работы (185,22 кДж/кг) и максимальным снижением температуры $\Delta T = 103,6$ К.

Использование расширительной машины, например турбодетандера ДГУ (процесс 0-4, рис. 2), позволяет совершить работу порядка

148,2 кДж/кг, используемую для выработки электрической энергии или для привода турбокомпрессора. При этом снижение температуры газа составит $\Delta T = 87,8$ К, что также потребует нагрева газа при передаче его потребителю. Таким образом, помимо полезной работы, получаемой в расширительной машине, для приведения газа

Рис. 2. Процессы расширения метана в T - S -диаграмме:

- 0-1 — изотермический процесс;
- 0-2 — изохэнтальпийный процесс (дресселирование);
- 0-3 — изоэнтропийный процесс;
- 0-4 — реальный процесс расширения газа в дизель-генераторной установке (ДГУ);
- 0-5 — реальный процесс расширения в вихревой трубе;
- 0-6 — процесс расширения в вихревой трубе с потребителем холода

к той же температуре на выходе из ГРС потребуются привлечение внешнего источника теплоты мощностью, эквивалентной произведенной на турбодетандере работе. Вместе с тем, несомненным преимуществом использования расширительной машины (турбодетандера) в данном случае является получение механической энергии с большей эффективностью (в 1,5–2,0 раза), чем при использовании традиционных установок по преобразованию тепловой энергии в механическую работу.

Для предотвращения выпадения влаги и твердых образований при снижении температуры газа, как правило, применяют предварительный нагрев газа на входе в ДГУ до температуры, позволяющей избежать, в том числе, низких температур в конце процесса расширения. Тем самым обеспечивается надежность работы ДГУ и подача газа в сеть после ГРС с температурой не ниже 5 °С. Выбор источника подогрева газа является одним из основных при использовании этих агрегатов. Это связано с тем, что способ подогрева газа существенно влияет на себестоимость производимой детандер-генераторным агрегатом (ДГА) электроэнергии. Поэтому выбор и оптимизация схемы подогрева газа в ДГА является одной из приоритетных задач, решаемых при их проектировании.

Из условий отказа от использования для подогрева газового топлива оригинальным решением [12, 15, 18] является использование для предварительного нагрева газа на входе в ДГУ низкопотенциальных источников теплоты (с повышением их температурного уровня с помощью тепловых насосов). В этом случае вырабатываемой с помощью ДГУ электроэнергии может быть достаточно для подогрева газа, для собственных нужд ГРС и для выдачи ее в определенном количестве внешним потребителям.

Широко применяемым в последнее время решением для ГРС является использование вихревого эффекта Ранке–Хилша в аппаратах дросселирования природного газа [16, 23]. Принципиальная схема аппарата дросселирования природного газа с использованием вихревого эффекта представлена на рис. 3.

Уравнение энергии проходящего через вихревую трубу газа описывается формулой

$$h_0 = \mu h_x + (1 - \mu) h_r,$$

где h_x , h_r — энтальпии соответственно холодного и горячего потоков газа; μ — относительный расход холодного потока, определяемого как $\mu = G_x / G_0$.

Как видно из формулы, идеальный процесс расширения в вихревой трубе соответствует изоэнтальпийному процессу (процесс 0–2, рис. 2). В реальных условиях такой процесс трудно обеспечить в вихревой трубе. Как показали исследования [23], процесс в вихревой трубе, как правило, сопровождается акустическими волнами и передачей некоторой части теплоты в окружающую среду. Реальный процесс дросселирования в вихревой трубе показан на рис. 2 (процесс 0–5). В этом случае температура газа после процесса дросселирования и последующего смешения будет несколько ниже, чем температура газа при изоэнтальпийном процессе. При определенном нагреве, например, холодного потока в теплообменнике 2 (см. рис. 3), можно получить температуру газа после процесса дросселирования больше, чем исходная температура (процесс 0–6, рис. 2).

С целью предотвращения снижения температуры редуцируемого газа выполнен ряд исследо-

Рис. 3. Принципиальная схема дросселирования природного газа в вихревой трубе с потребителем холода: 1 — вихревая труба; 2 — теплообменник; 3 — потребитель холода

ваний [14, 16] по созданию установок получения квазиизотермического процесса дросселирования давления природного газа. В этом случае за счет использования особенностей вихревых процессов [16] можно, по данным авторов, избежать снижения температуры газа при работе регуляторов газа. Такие устройства, по всей видимости, могут найти применение на газораспределительных пунктах (ГРП) и небольших по мощности ГРС.

Учитывая значительную разницу условий эксплуатации различных ГРС, имеются предложения [10, 15] по безогневному способу «подогрева газа перед дросселированием за счет частичного использования располагаемого перепада давления на винтовой расширительной машине» или энергии ветроколеса, которые «приводят во вращение специальный насос. Жидкость, прокачиваемая насосом, подается в жидкостный вихревой тепловой генератор, в котором за счет гидродинамических процессов течения вихревых потоков жидкости (вода, антифриз) без подвижных механических элементов происходит повышение температуры до 90–100 °С, что используется для нагрева газа в специальных теплообменниках». При реализации такой схемы отбор газа на технические нужды подогрева транспортируемого газа при определенных условиях можно полностью исключить.

Прогресс в области развития установок с использованием возобновляемых источников энергии способствует их более широкому применению и на ГРС [17, 18]. Здесь перспективной областью применения ВИЭ являются автономные энергосистемы, располагающиеся, как правило, в труднодоступных, удаленных от централизованных источников электроснабжения районах, преимущественно с высоким потенциалом ВИЭ. Оптимизация сочетания состава и параметров оборудования [22] энергокомплексов с использованием ВИЭ приводит для ряда объектов к более экономичному, по сравнению с выработкой от традиционных источников, электроснабжению.

Выводы

1. Развернутые в последние годы работы, направленные на оптимизацию затрат и повышение экономической эффективности систем газоснабжения, активизировали исследования по совершенствованию схемных решений энерге-

тических систем ГРС, применению турбодетандеров, тепловых насосов, исследованию процессов квазиизотермического истечения газов при дросселировании и др.

2. Многофункциональность схемных решений энергетических систем ГРС, переменность режимов генерации и потребления тепловой и электрической энергии на них, многообразие исходных данных при проектировании формируют необходимость, исходя из условий создания надежных безуглеродных и малоуглеродных систем энергоснабжения, разработки алгоритмов и моделей интеллектуального управления энергокомплексами на ГРС.

Библиографический список

1. Бушуев В. В., Громов А. И., Белогорьев А. М., Матепанов А. М. Энергетика России: постстратегический взгляд на 50 лет вперед. М.: ИАЦ «Энергия», 2016. 96 с.
2. Фокин Г. А., Забелин Н. А., Иванов В. М., Смирнов М. В. Комплексные энерго- и ресурсосберегающие решения, применяемые на объектах ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» // Газовая промышленность. 2018. № 6. С. 98–102.
3. Рогова А. А. Разработка и исследование схем тригенерационных установок на базе детандер-генераторного агрегата и тепловых насосов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 163 с.
4. Аверьянов В. К., Блинов А. Н., Митрофанов В. А., Хаев В. К., Цвик А. А. Обоснование целесообразности использования установок сжижения природного газа в качестве источника пикового и резервного топлива для ГТ-ТЭС и ПГУ-ТЭС // Газинформ. 2016. № 2 (52). 2016. С. 52–58.
5. Энергоэффективный мегаполис — Smart City «Новая Москва» / под ред. В. В. Бушуева, П. А. Ливинского. М.: ИД «Энергия». 2015. 76 с.
6. Аверьянов В. К., Карасевич А. М., Федяев А. В. Системы малой энергетики: современное состояние и перспективы развития. В 2 т. М.: ИД «Страховое ревю», 2008. 962 с.
7. Директор Л. Б., Зайченко В. М., Майков И. Л. Интеллектуальные системы управления автономными энергетическими комплексами в составе локальных распределительных сетей малой энергетики // Известия РАН. Энергетика. 2012. № 1. С. 38–48.
8. Елистратов В. В. Возобновляемая энергетика. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2016. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/s16-145.pdf>; <http://doi.org/10.18720/SPBPU/2/s16-145>

9. Дистанов Р. Ю., Посмак М. П., Лигачев А. В. Перспективы развития газораспределительных станций ПАО «Газпром» // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 12. С. 34–38.

10. Пятничко А. И., Крушневич С. П. Эффективная выработка электроэнергии на ГРС и ГРП при использовании перепада давлений газа // Технические газы. 2012. № 4. С. 48–51.

11. Мальханов В. П. Турбодетандерные агрегаты в системах подготовки и распределения природного газа. М.: Нефть и газ, 2004. 228 с.

12. Агабабов В. С., Смирнова У. И., Колосов А. М. Оценка эффективности работы бестопливных энергогенерирующих установок для производства электроэнергии в системе газоснабжения // Вестник МЭИ. 2010. № 2. С. 15–20.

13. Фокин Г. А. Методология создания автономных турбинных источников электрической энергии, использующих энергию сжатого природного газа для собственных нужд газотранспортной системы России: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2015. 456 с.

14. Гуринов С. В. Разработка технологии квазиизотермического редуцирования давления для объектов системы транспортировки и распределения природного газа: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2008. 111 с.

15. Клименко А. В., Агабабов В. С., Борисова П. Н., Петин С. Н., Корягин А. В. Бестопливная тригенерационная установка на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа // Теплоэнергетика. 2018. № 11. С. 23–31.

16. Русак А. М., Юрьев В. Л., Ахметов Ю. М., Целищев В. А., Кармацкий П. М., Гуринов С. В. Использование особенностей вихревых течений для получения квазиизотермического процесса дросселирования давления природного газа // Сб. науч. тр. АН РБ «Проблемы машиноведения и критических технологий в машиностроительном комплексе РБ». Уфа: Гилем, 2005. С. 37–49.

17. Фокин Г. А. Автономные источники электрической и тепловой энергии для магистральных газопроводов и газораспределительных станций. М.: Физматлит, 2015. 163 с.

18. Колосов А. М. Повышение эффективности работы энергогенерирующей установки на базе детандер-генераторного агрегата и теплового насоса за счет использования энергии возобновляемых источников: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 133 с.

19. Костюченко П. А. Повышение энергетической эффективности детандер-генераторных агрегатов за счет применения ветроэнергетической установки: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 261 с.

20. Аверьянов В. К., Оплачко А. В., Толмачев В. Н., Шаповало А. А. Особенности формирования системы интеллектуального управления энергоснабжением автономных объектов при использовании возобновляе-

мых источников энергии // Наука и техника в газовой промышленности. 2017. № 3. С. 94–107.

21. Воронов В. А., Самигуллин Г. Х., Рузманов А. Ю. Повышение энергетических характеристик газораспределительной станции путем применения турбодетандера // Технические науки. 2017. Вып. № 4 (58). С. 35–39.

22. Долотовский И. В., Ларин Е. А., Долотовская Н. В. Системный анализ энергетического комплекса предприятий подготовки и переработки газа. Саратов: Буква, 2014. 324 с.

23. Бетлинский В. Ю., Жидков М. А., Овчинников В. П., Жидков Д. А. Экспериментальное исследование термодинамической эффективности регулируемой вихревой трубы на природном газе // Нефтегазовые технологии. 2008. № 2. С. 2–6.

24. Зацепин С. С., Купцов С. М. Применение турбодетандерных установок на газораспределительных станциях // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 12. С. 50–53.

25. Шаповало А. А. Комплекс организационно-технических решений по совершенствованию работы энергохозяйств дочерних обществ ПАО «Газпром» в современных условиях // Газовая промышленность. 2017. № 11 (760). С. 18–30.

26. Яценко И. А., Хворов Г. А., Юмашев М. В., Юров Е. В. Реализация потенциала энергосбережения и повышение энергетической эффективности ПАО «Газпром» на основе применения турбодетандерных технологий // Газовая промышленность. 2017. Спецвыпуск № 1 (750). С. 60–63.

References

1. Bushuev V. V., Gromov A. I., Belogor'ev A. M., Mastepanov A. M. *Ehnergetika Rossii: poststrategicheskiy vzglyad na 50 let vpered* [Power energy of Russia: a post-strategy look towards 50 years ahead]. Moscow, Ehnergiya Publ., 2016, 96 p.

2. Fokin G. A., Zabelin N. A., Ivanov V. M., Smirnov M. V. *Kompleksnye ehnergo- i resursosberegayushchie resheniya, primenyaemye na ob'ektakh* ООО «Gazprom transgaz Sankt-Peterburg» [Complex energy-and resource-saving solutions used at the facilities of LLC "Gazprom transgaz St. Petersburg"]. *Gazovaya promyshlennost' – Gas industry*, 2018, no. 6, pp. 98–102.

3. Rogova A. A. *Razrabotka i issledovanie skhem trigeneratsionnykh ustanovok na baze detander-generatornogo agregata i teplovykh nasosov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of schemes of trigeneration plants based on expander-generator set and heat pumps. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2014, 163 p.

4. Aver'yanov V. K., Blinov A. N., Mitrofanov V. A., Khaev V. K., Tsvik A. A. *Obosnovanie tselesoobraznosti*

ispol'zovaniya ustanovok szhizheniya prirodnogo gaza v kachestve istochnika pikovogo i rezervnogo topliva dlya GT-TEhS i PGU-TEhS [Rationale for the use of natural gas liquefaction plants as a source of peaking and back-up fuel for the GT-thermal power plants and CCGT-TPP]. *Gazinform – Gasinform*, 2016, no. 2 (52), pp. 52–58.

5. *Ehnergoehffektivnyy megapolis – SmartCity «Novaya Moskva»* [Energy-efficient metropolis – SmartCity “New Moscow”]. Eds. Bushuev V. V., Livinskoy P. A. Moscow, Ehnergiya Publ., 2015, 76 p.

6. Aver'yanov V. K., Karasevich A. M., Fedyaev A. V. *Sistemy maloy ehnergetiki: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Systems of small power engineering: current state and prospects of development]. In 2 vols. Moscow, Strakhovoe revyu Publ., 2008, 962 p.

7. Direktor L. B., Zaychenko V. M., Maykov I. L. *Intellektual'nye sistemy upravleniya avtonomnymi ehnergeticheskimi kompleksami v sostave lokal'nykh raspredelitel'nykh setey maloy ehnergetiki* [Intelligent control systems of autonomous energy complexes as part of local distribution networks of small power]. *Izvestiya RAN. Ehnergetika – Bulletin of RAS. Energy Industry*, 2012, no. 1, pp. 38–48.

8. Elistratov V. V. *Vozobnovlyаемая ehnergetika* [Renewable energy]. St. Petersburg, Izd-vo politekhn. un-ta Publ., 2016. Available at: <http://elbib.spbstu.ru/dl/2/s16-145.pdf>

9. Distanov R. Yu., Posmak M. P., Ligachev A. V. *Perspektivy razvitiya gazoraspredelitel'nykh stantsiy PAO «Gazprom»* [Prospects of development of gas distribution stations of OJSC “Gazprom”]. *Territoriya «NEFTEGAZ» – Territory “OilGas”*, 2016, no. 12, pp. 34–38.

10. Pyatnichko A. I., Krushnevich S. P. *Ehffektivnaya vyrabotka ehlektroehnergii na GRS i GRP pri ispol'zovanii perepada davleniy gaza* [Efficient power generation at GDS and GPRS using gas pressure drop]. *Tekhnicheskie gazy – Technical gases*, 2012, no. 4, pp. 48–51.

11. Mal'khanov V. P. *Turbodetandernye agregaty v sistemakh podgotovki i raspredeleniya prirodnogo gaza* [Turbine expansion units in the system of preparation and distribution of natural gas]. Moscow, Neft' i Gaz Publ., 2004, 228 p.

12. Agababov V. S., Smirnova U. I., Kolosov A. M. *Otsenka ehffektivnosti raboty bestoplivnykh ehnergogeneriruyushchikh ustanovok dlya proizvodstva ehlektroehnergii v sisteme gazosnabzheniya* [Evaluation of the effectiveness of fuel-free installations for electricity production in the gas supply system]. *Vestnik MEhI – MEI Bulletin*, 2010, no. 2, pp. 15–20.

13. Fokin G. A. *Metodologiya sozdaniya avtonomnykh turbinnykh istochnikov ehlektricheskoy ehnergii, ispol'zuyushchikh ehnergiyu szhatogo prirodnogo gaza dlya sobstvennykh nuzhd gazotransportnoy sistemy Rossii*. Diss. dokt. tekhn.nauk [Methodology of creating

autonomous turbine sources of electric energy using energy of compressed natural gas for own needs of gas transportation system of Russia. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2015, 456 p.

14. Gurin S. V. *Razrabotka tekhnologii kvaziizotermicheskogo redutsirovaniya davleniya dlya ob'ektov sistemy transportirovki i raspredeleniya prirodnogo gaza*. Diss. kand. tekhn.nauk [Development of quasi-isothermal pressure reduction technology for natural gas transportation and distribution system facilities. PhD in Sci. Tech. diss.]. Ufa, 2008, 111 p.

15. Klimenko A. V., et al. *Bestoplivnaya trigeneratsionnaya ustanovka na stantsiyakh tekhnologicheskogo umen'sheniya davleniya transportiruemogo prirodnogo gaza* [Fuel-free tri-generation installation at stations technology reducing the pressure of the transported natural gas]. *Teploehnergetika – Heat Power Engineering*, 2018, no. 11, pp. 23–31.

16. Rusak A. M., et al. *Ispol'zovanie osobennostey vikhrevykh techeniy dlya polucheniya kvaziizotermicheskogo protsessa drosselirovaniya davleniya prirodnogo gaza* [Using features of vortex flows to obtain a quasi-isothermal process of throttling the pressure of natural gas]. *Trudy AN RB «Problemy mashinovedeniya i kriticheskikh tekhnologiy v mashinostroitel'nom komplekse RB»* [Proc. of AS RB “Problems of machine science and critical technologies in the machine-building complex of RB”]. Ufa, Gilem Publ., 2005, pp. 37–49.

17. Fokin G. A. *Avtonomnye istochniki ehlektricheskoy i teplovoy ehnergii dlya magistral'nykh gazoprovodov i gazoraspredelitel'nykh stantsiy* [Autonomous sources of electric and thermal energy for main gas pipelines and gas distribution stations]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2015, 163 p.

18. Kolosov A. M. *Povyshenie ehffektivnosti raboty ehnergogeneriruyushchey ustanovki na baze detander-generatornogo agregata i teplovogo nasosa za schet ispol'zovaniya ehnergii vozobnovlyаемых istochnikov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of power generating plants based on turbo-expander-generator units and heat pump through using renewable energy sources. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2011, 133 p.

19. Kostyuchenko P. A. *Povyshenie ehnergeticheskoy ehffektivnosti detander-generatornykh agregatov za schet primeneniya vetroehnergeticheskoy ustanovki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the energy efficiency of turbo-expander-generator units through the use of a wind power plant. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2011, 261 p.

20. Aver'yanov V. K., Oplachko A. V., Tolmachev V. N., Shapovalov A. A. *Osobennosti formirovaniya sistemy intellektual'nogo upravleniya ehnergosnabzheniem avtonomnykh ob'ektov pri ispol'zovanii vozobnovlyаемых istochnikov ehnergii* [Features of forming the system of power supply intellectual management of autonomous

objects using renewable energy sources]. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti – Science and technology in the gas industry*, 2017, no. 3, pp. 94–107.

21. Voronov V. A., Samigullin G. Kh., Ruzmanov A. Yu. *Povyshenie ehnergeticheskikh kharakteristik gazoraspredelitel'noy stantsii putem primeneniya turbodetandera* [Increasing the power characteristics of gas distribution station by application of a turbo-expander]. *Tekhnicheskie nauki – Technical Sciences*, 2017, no. 4 (58), pp. 35–39.

22. Dolotovskiy I. V., Larin E. A., Dolotovskaya N. V. *Sistemnyy analiz ehnergeticheskogo kompleksa predpriyatiy podgotovki i pererabotki gaza* [System analysis of the energy enterprises complex for preparation and processing of gas]. Saratov, Bukva Publ., 2014, 324 p.

23. Betlinskiy V. Yu., Zhidkov M. A., Ovchinnikov V. P., Zhidkov D. A. *Ehksperimental'noe issledovanie termodinamicheskoy ehffektivnosti reguliruemoy vikhrevoy trubyy na prirodnom gaze* [Experimental investigation of the thermodynamic efficiency of the adjustable vortex tubes on natural gas]. *Neftegazovye tekhnologii – Oil and gas technologies*, 2008, no. 2, pp. 2–6.

24. Zatsepin S. S., Kuptsov S. M. *Primenenie turbodetandernykh ustanovok na gazoraspredelitel'nykh stantsiyakh* [Application of turbo-expander units on gas-distributing stations]. *Territoriya «NEFTEGAZ» – Territory «OILGAS*, 2016, no. 12, pp. 50–53.

25. Shapovalov A. A. *Kompleks organizatsionno-tekhnicheskikh resheniy po sovershenstvovaniyu raboty ehnergokhozyaystv dochernikh obshchestv PAO «Gazprom» v sovremennykh usloviyakh* [Complex of organizational and technical solutions for improving the performance of the energy entities of the subsidiaries of OJSC “Gazprom” in modern conditions]. *Gazovaya promyshlennost' – Gas industry*, 2017, no. 11 (760), pp. 18–30.

26. Yatsenko I. A., Khvorov G. A., Yumashev M. V., Yurov E. V. *Realizatsiya potentsiala ehnergoberezheniya i povyshenie ehnergeticheskoy ehffektivnosti PAO «Gazprom» na osnove primeneniya turbodetandernykh tekhnologiy* [Realization of energy saving potential and increasing the energy efficiency of OJSC “Gazprom” on the basis of applying the turbo-expander technologies]. *Gazovaya promyshlennost' – Gas industry*, 2017, no. 1 (750), pp. 60–63.