



Автономное энергоснабжение газораспределительной станции с использованием альтернативных источников энергии

Рецензия эксперта на статью получена 11.11.2020 [Expert review on the article received on November 11, 2020].

Развернутые в последние годы работы, направленные на оптимизацию затрат и повышение экономической эффективности систем газоснабжения, сделали актуальным вопрос совершенствования подходов к проектированию, строительству и эксплуатации газораспределительных станций (ГРС) [1, 3 и др.]. Современные исследования, касающиеся энергоснабжения ГРС, посвящены вопросам совершенствования схемных решений их энергетических систем, использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ), применению детандер-генераторных агрегатов (ДГА), тепловых насосных установок (ТНУ), исследованию процессов «квази-изотермического» истечения газов при дросселировании и др.

В связи с развитием работ по использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для автономного энергоснабжения [2] стали актуальными вопросы их применения в системах газоснабжения [4]. В формируемой в ПАО «Газпром» программе создания в перспективе автоматизированных газораспределительных станций нового поколения (АГРС-НП) определены общие требования [3]:

- электроснабжение от источника, расположенного на территории АГРС-НП и использующего принцип преобразо-

вания энергии сжатого (транспортируемого) газа и/или возобновляемые источники энергии;

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

Современные исследования, касающиеся энергоснабжения газораспределительных станций, посвящены вопросам совершенствования схемных решений их энергетических систем, использованию ВИЭ, применению детандер-генераторных агрегатов, тепловых насосных установок, исследованию процессов истечения газов

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 вдоль трассовых потребителей в системе транспорта газа [3].

УДК 620.91–93:620.97. Номер научной специальности: 05.14.08.

Автономное энергоснабжение газораспределительной станции с использованием альтернативных источников энергии

В.К. Аверьянов, д.т.н., профессор, член-корреспондент РААСН, советник генерального директора АО «Газпром промгаз»; **О.А. Давыдов**, инженер, заместитель генерального директора по строительству инфраструктурных объектов ООО «Русхимальянс»; **В.В. Елистратов**, д.т.н., профессор, директор НОЦ «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе»; **С.Н. Кирюхин**, к.т.н., доцент, заместитель заведующего отделом АО «Газпром промгаз»

Приведены результаты расчётных исследований режимов функционирования нового схемного решения энергокомплекса газораспределительной станции с пиковым и воздушным теплообменными аппаратами, преобразующими потенциальную энергию технологического газа и низкопотенциальную энергию возобновляемых источников. Определён оптимальный состав оборудования энергокомплекса при минимальном значении капитальных затрат на его создание.

Ключевые слова: газораспределительная станция, энергетическая система, возобновляемый источник энергии, детандер-генераторный агрегат, тепловая насосная установка.

UDC 620.91–93:620.97. The number of scientific specialty: 05.14.08.

Autonomous power supply to a gas distribution station using alternative energy sources

V. K. Averyanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, adviser to the general director of "Gazprom Promgaz", JSC; **O. A. Davydov**, an engineer, deputy general director for construction of infrastructure facilities of "Rochemolles", LLC; **V. V. Elistratov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, director of the "Renewable Energy and Installations Based on Them" Research and Educational Center; **S. N. Kiryukhin**, PhD, Associate Professor, deputy head of the department of "Gazprom Promgaz", JSC

The results of computational studies of the operating modes of a new circuit solution for a gas distribution station power complex with peak and air heat exchangers that convert the potential energy of process gas and low-potential energy from renewable sources are presented. The optimal composition of the power complex equipment is determined with the minimum value of capital expenditures for its building.

Key words: gas distribution station, power system, renewable energy source, expander-generator unit, heat pumping unit.



С учётом этого, актуальными становятся следующие направления исследований:

- оптимизация системы энергоснабжения ГРС с использованием энергоустановок на основе возобновляемых и нетрадиционных видов энергии (ВиНВЭ);
- разработка на основе ВиНВЭ схемных решений и алгоритмов интеллектуального управления технологически связанными энергетическими элементами и системами газораспределительных станций, имеющих функции прогнозирования режимов работы объекта, прихода энергии от ВиНВЭ и параметров систем управления спросом на тепловую и электроэнергию энергоприёмников ГРС.

Эксплуатационной особенностью ГРС является возможность использования потенциальной энергии газа, поступающего на станцию. Поэтому значительное число работ [4, 5, 10] посвящено таким исследованиям.

Как известно, энергии, вырабатываемой детандер-генераторными агрегатами (ДГА), недостаточно для подогрева требуемого количества газа и обеспечения собственных нужд станции. В соответствии с этим автономная бестопливная система энергоснабжения [4], использование которой возможно на АГРС-НП, должна иметь в своём составе источник (или несколько источников) энергии, использующего теплоту окружающего ГРС грунта, воздуха, солнечную энергию, а также энергию движущихся потоков воздуха (ветра), то есть возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Анализу схемных решений ГРС с установками ВИЭ для энергоснабжения ГРС посвящены работы [4, 10]. В них исследованы системы энергоснабжения с использованием потенциала внешних источников (грунтовых теплообменников, гелиосистем и др.) и тепловых насосов. Однако в цитируемых работах не в полной мере рассмотрены вопросы оптимизации установок ДГА с ВИЭ и грунтовыми теплообменниками (ГТО) для обеспечения автономным гибридным энергокомплексом



сом (ГЭК) только собственных нужд ГРС. Переменный характер выработки электрической энергии с помощью гелио- и ветроустановок определяет необходимость разработки схемных решений ГЭК на основе ВИЭ, которые при требуемой надёжности, были бы эффективными с учётом конкретных местных условий. Для этого АСУ ГЭК должна быть «интеллектуальной» и адаптивной к возмущающим воздействиям, а алгоритмы её функционирования должны обеспечивать бесперебойное энергоснабжение ГРС.

Более эффективному решению сформулированной задачи способствует в том числе использование накопителей тепловой и электрической энергии. В таком случае выбор установленной мощности автономного источника электроэнергии ГЭК производится по среднему значению нагрузки, а покрытие пиков нагрузки осуществляется использованием электроэнергии аккумуляторной батареи, заряжаемой в периоды провалов графика нагрузки. Тепловой аккумулятор выравнивает тепловую нагрузку. Этим самым снижаются затраты на оборудование ГЭК и улучшаются его эксплуатационные показатели. Использование подобного рода бестопливного ГЭК на ГРС позволяет отказаться от внешнего электроснабжения.

Анализ ранее выполненных работ показывает, что при применении ДГА для устойчивого снабжения ГРС тепловой и электрической энергией в достаточном количестве необходимыми могут быть установки, работающие на низкопотенциальной энергии земли, то есть геотермальные тепловые насосы, проблемам использования которых посвящено значительное число работ [6–8, 10]. Совокупность создаваемых с этой целью скважин с грунтовыми теплообменниками и окружающим массивом грунта представляет

собой систему сбора данной низкопотенциальной энергии.

По результатам многочисленных исследований установлено, что значения теплового потока в грунтовых теплообменниках колеблются от 20 до 70 Вт с 1 м скважины. Использование аналитических моделей расчёта позволяет учесть специфику грунта в месте строительства и, соответственно, позволяет создать более эффективный (по капиталовложениям) источник тепловой энергии [6].

Анализируя проведённые исследования в области использования низкопотенциальной тепловой энергии грунта для геотермальных теплонасосных систем тепло- и холодоснабжения зданий и сооружений [7, 8], можно сделать вывод, что, несмотря на фундаментальность и всесторонность исследований, вопросы динамики процессов теплосъёма и аккумуляции теплоты в грунтовых теплообменниках в суточном режиме рассмотрены не в полном объёме. Кроме того, отсутствует методика оптимизации системы сбора низкопотенциальной энергии грунта (СНЭГ) для целей теплоснабжения АГРС, учитывающая индивидуальные особенности энергопотребления АГРС, генерации электроэнергии ДГА и энергопоступления от ВИЭ.

Ранее проведённые исследования показывают, что стоимость непосредственно ГТО для теплоснабжения зданий соизмерима со стоимостью остальной части гибридных энергокомплексов. Поэтому актуальна задача по снижению стоимости грунтовых теплообменников путём реализации технических решений:

1. Перевод ГТО в режим циклической знакопеременной работы. Результаты функционирования системы теплоснабжения с ГТО энергоэффективного здания в знакопеременном режиме и данные [11] показывают (рис. 1), что теплопроизводительность ГТО существенно снижается в первые пять-десять дней. Периодическая подача избыточной теплоты от ВИЭ и ДГА в этом периоде может компенсировать теплотребление и поэтому теплопроизводительность тепловых насосных установок (ТНУ) с ГТО сохранится на высоком уровне, что в итоге позволит снизить расчётную мощность ГТО.

2. Устройство системы интенсификации теплообмена увлажнением грунта в зоне скважин. Это решение может использоваться в критических режимах в качестве резервного, если ГТО размещён в районе с сухим водопроницаемым грунтом.

3. Снижение расчётной нагрузки на ГТО интеллектуальным управлением энергопотребления АГРС-НП, так как ряд потребителей энергии АГРС-НП имеют свойство временной избыточности, позволяющее сгладить пиковое энергопотребление для минимизации расчётной мощности ГТО и оборудования АГРС.

4. Оптимизация параметров совместной работы ГТО с альтернативным источником низкопотенциальной тепловой энергии (ВИЭ, воздушные калориферы и др.) и ДГА позволяет повысить эффективность функционирования гибридного энергокомплекса.

5. Для решения поставленной задачи используется известное [9, 10] базовое схемное решение энергокомплекса ГРС, дополненное оборудованием (ПКТО и ВТО) и связями между ними, характерными для автономного энергокомплекса АГРС-НП (рис. 2), реализующего термодинамические процедуры оптимального преобразования потенциальной энергии технологического газа и низкопотенциальной энергии ВИЭ.

Установка с ДГА и ТНУ функционирует следующим образом. Технологический газ по магистрали высокого давления поступает на ГРС. Для выработки электроэнергии используется установка ДГА, в состав которой (кроме ДГА) входит электрический пиковый теплообменник подогрева газа перед детандером ПКТО. Снижение

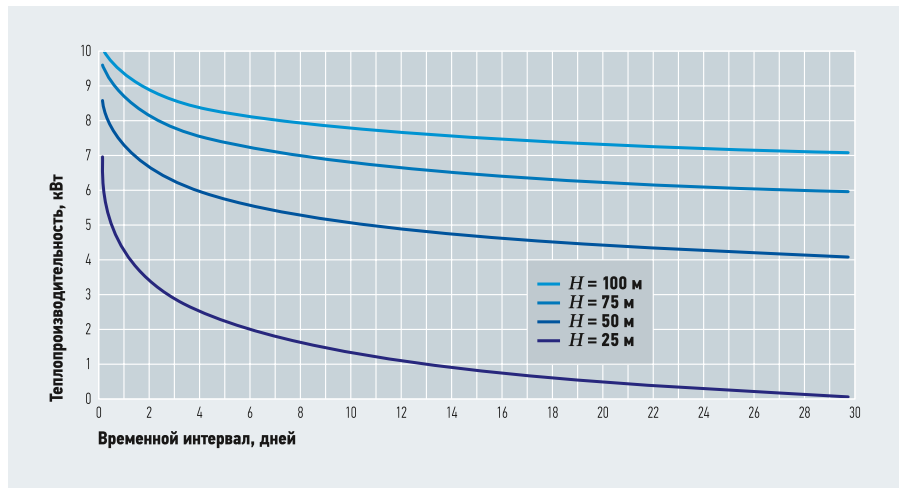


Рис. 1. Изменение теплопроизводительности ГТО при различных H для теплофизических характеристик $\lambda = 0,45$ Вт/(м·К) и $a = 3,2$ м²/с [11]

давления в детандере осуществляется за счёт расширения потока транспортируемого газа, при этом в генераторе ДГА вырабатывается электроэнергия. Часть электроэнергии, вырабатываемой электрогенератором ДГА, подаётся на привод компрессора ТНУ, остальное подаётся на ПКТО и на собственные нужды ГРС. Для основного подогрева газа перед ДГА в теплообменнике до температуры 50–80 °С используется парокompрессионная ТНУ, в состав которой входят испаритель, компрессор, дросселирующее устройство

и конденсатор, являющийся одновременно теплообменником подогрева газа.

В испарителе фазовое превращение хладагента происходит за счёт теплоты низкого температурного потенциала, поступающего от грунтового аккумулятора и от воздушного теплообменника, являющихся в данном случае источниками низкопотенциальной энергии (ВИЭ). При незначительных расходах газа в ночное время и отсутствии энергопоступления от ВИЭ, бесперебойность энергоснабжения потребителей собственных нужд ГРС может быть нарушена, что влечёт за собой необходимость использования электрических аккумуляторов, не указанных на базовой схеме.

С целью снижения проектной мощности ГТО, предотвращения его промерзания и повышения эффективности работы ТНУ должна предусматриваться его стратифицированная «накачка» в периоды поступления энергии от ВИЭ. Таким образом осуществляется естественная балансировка процесса генерации энергии и её потребления с сохранением высокого температурного потенциала грунтовых теплообменников.

Возможность минимизации затрат на создание энергокомплекса проверяется путём имитационного моделирования процессов преобразования энергетических потоков в условиях нестационарного потребления вырабатываемой энергии и поступления возобновляемых энергетических ресурсов на основе изменения теплового баланса и статических характеристик элементов энергокомплекса по выбранному критерию минимизации.

Альтернативные варианты организации автономного бестопливного энергоснабжения при существенно отличающихся капитальных затратах имеют практически равные эксплуатационные расходы. Поиск оптимального варианта состава оборудования энергокомплекса АГРС-НП с ВИЭ по критерию минималь-

Периодическая подача избыточной теплоты от ВИЭ и ДГА в этом периоде может компенсировать теплотребление и поэтому теплопроизводительность ТНУ с ГТО сохранится на высоком уровне, что в конечном итоге позволит снизить расчётную мощность ГТО

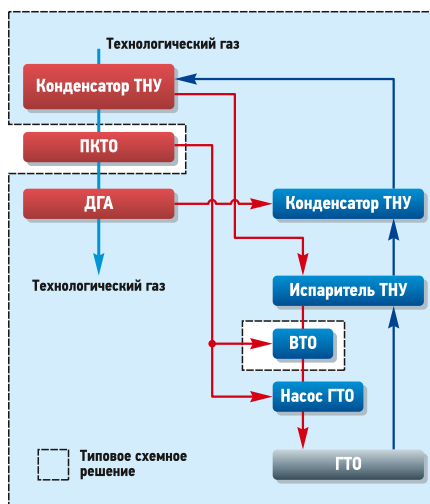


Рис. 2. Функциональная схема энергокомплекса АГРС-НП (ТНУ — тепловая насосная установка; ПКТО — пиковый теплообменник; ДГА — детандер-генераторный агрегат; ВТО — воздушный теплообменник; ГТО — грунтовый теплообменник)

ного значения капитальных затрат осуществляется расчётным путём с использованием имитационной модели, разработанной в пакете прикладных программ MATLAB (рис. 3), в следующем порядке:

- для заданных значений мощности нагрузки, соотношения тепловых мощностей конденсатора ТНУ и ПКТО, а также параметров технологического газа, рассчитывается вырабатываемая ДГА мощность и количество тепловой энергии на подогрев газа для предотвращения критического снижения его температуры за турбиной ДГА;
- для рассчитанного количества теплоты, передаваемой газу конденсатором ТНУ, определяются параметры хладагента, расходные и мощностные характеристики ТНУ;
- по количеству теплоты, передаваемой хладагенту в испарителе ТНУ, определяются параметры теплоносителя, расход-

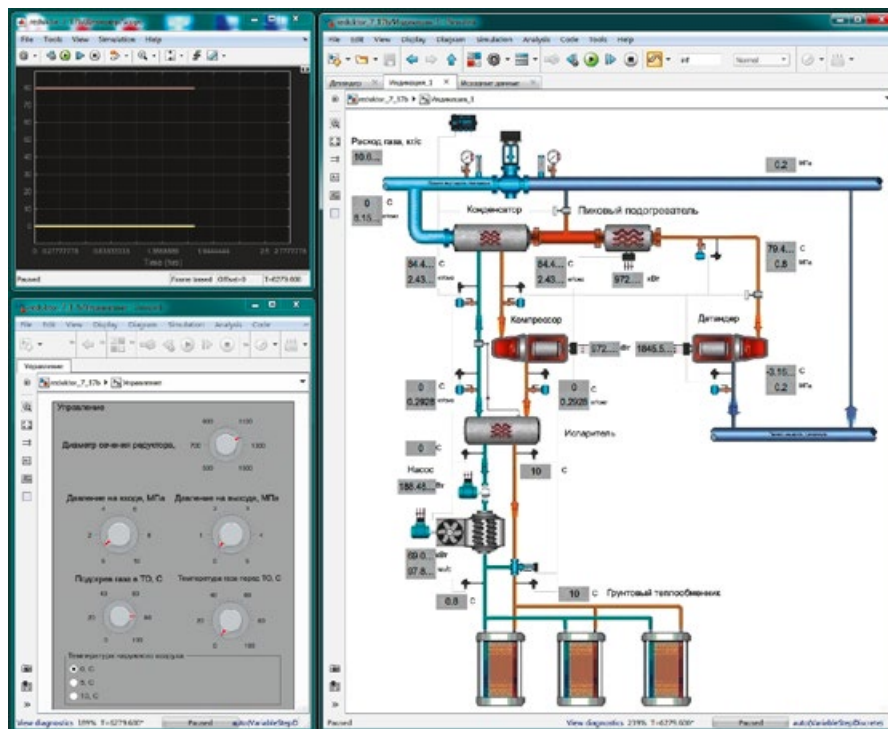


Рис. 3. Интерфейс имитационной модели энергокомплекса АГРС-НП с использованием ВИЭ

Результаты расчётов мощностных характеристик оборудования и капитальных затрат на создание энергокомплекса АГРС-НП с ВИЭ табл. 1

Исходные данные		Результаты расчётов						
Отношение мощностей ПКТО/конденсатор ТНУ $Q_{ПКТО}/Q_{к.ТНУ}$	Мощность внешней нагрузки $N_{вн}$, кВт	Мощность ДГА $N_{ДГА}$, кВт	Мощность конденсатора ТНУ $N_{к.ТНУ}$, кВт	Мощность ПКТО $N_{ПКТО}$, кВт	Стоимость ДГА $C_{ДГА}$, \$	Стоимость ТНУ и ГТО $C_{ТНУ}$, \$	Стоимость ПКТО $C_{ПКТО}$, \$	Стоимость суммарная C_{Σ} , \$
0	20,03	68,00	30,01	0	51 000	285 813	0	336 813
0,1	20,05	65,04	23,02	6,50	48 780	245 990	1300	296 070
0,2	20,04	65,04	18,26	12,99	48 780	218 748	2598	270 126
0,3	20,02	66,15	14,11	19,78	49 612,5	194 820	3956	248 389
0,4	20,01	69,48	10,76	27,68	52110	175 610	5536	233 256
0,5	20,01	76,53	8,282	38,08	57 397,5	161 415	7616	226 429
0,6	20,03	87,83	6,00	52,46	65 872,5	148 410	10 492	224 775
0,7	20,03	107,8	4,05	75,14	80 850	137 105	15 028	232 983
0,8	20,01	149,9	2,47	119,40	112 425	127 713	23 880	264 018
0,9	20,01	280,5	1,325	251,60	210 375	120 403	50 320	381 098
0	40,10	135,8	59,93	0	101 850	570 775	0	672 625
0,1	40,04	129,9	45,98	12,98	97 425	491 300	2596	591 321
0,2	40,03	129,9	36,47	25,93	97 425	436 900	5186	539 511
0,3	40,03	132,3	28,22	39,56	99 225	389 640	7912	496 777
0,4	40,03	139,0	21,51	55,35	104 250	351 220	11 070	466 540
0,5	40,03	153,1	16,56	76,17	114 825	322 830	15 234	452 889
0,6	40,02	175,5	11,99	104,80	131 625	296 523	20 960	449 108
0,7	40,03	215,5	8,09	150,10	161 625	273 998	30 020	465 643
0,8	40,02	299,8	4,94	238,80	224 850	255 425	47 760	528 035
0,9	40,01	560,9	2,65	503,10	420 675	240 720	100 620	762 015
0	70,02	237,7	104,90	0	178 275	999 175	0	1 177 450
0,1	70,03	227,2	80,41	22,71	170 400	859 350	4542	1 034 292
0,2	70,00	227,2	63,78	45,36	170 400	764 150	9072	943 622
0,3	70,03	231,4	49,36	69,20	173 550	681 700	13 840	869 090
0,4	70,02	243,1	37,63	96,83	182 325	614 550	19 366	816 241
0,5	70,02	267,7	28,98	133,20	200 775	564 825	26 640	792 240
0,6	70,03	307,0	20,98	183,40	230 250	518 925	36 680	785 855
0,7	70,01	376,9	14,15	262,60	282 675	479 400	52 520	814 595
0,8	70,02	524,6	8,65	417,80	393 450	447 100	83 560	924 110
0,9	70,00	981,3	4,63	880,20	735 975	421 175	176 040	1 333 190

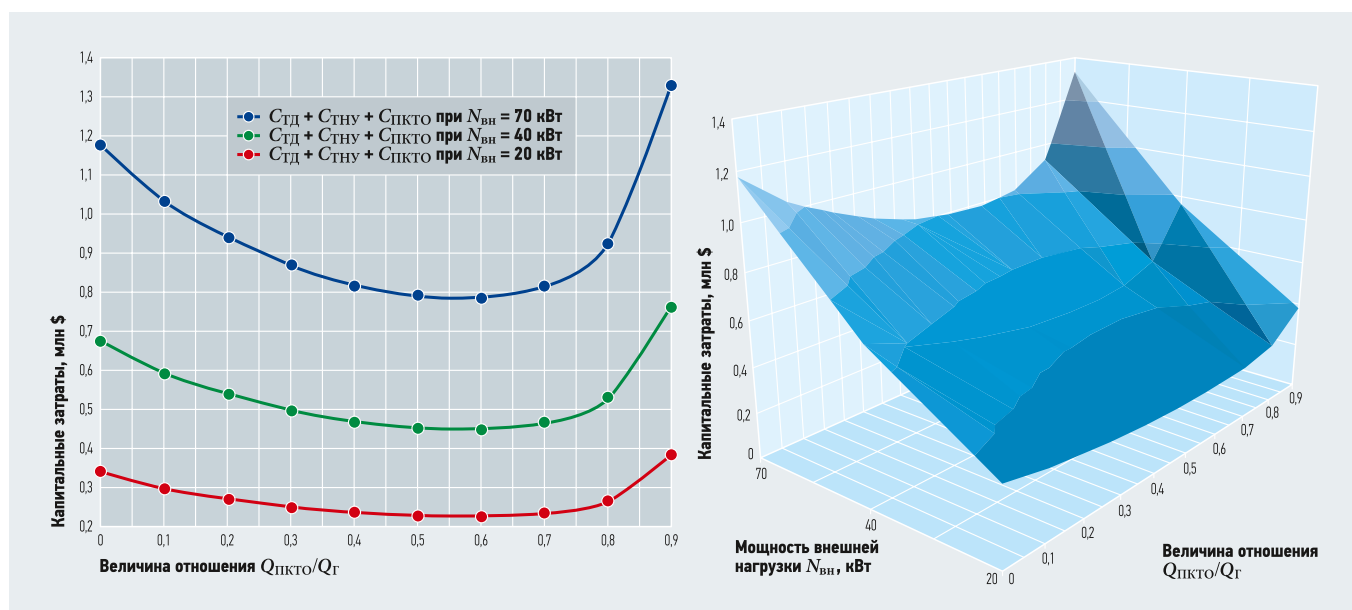


Рис. 4. Результаты расчётов капитальных затрат на создание АГРС-НП с ВИЭ

ные и мощностные характеристики ГТО, обеспечивающего работу ТНУ и энергокомплекса АГРС-НП в целом;

□ устанавливая в качестве исходных условий расчёта различные соотношения мощностей базового и пикового подогревателей газа (конденсатора ТНУ и ПКТО, соответственно), определяются требуемые для обеспечения генерируемой детандер-генераторным агрегатом мощности характеристики теплонасосные установки и грунтового теплообменниками.

В качестве примера выполнены расчёты генерируемой детандер-генераторным агрегатом мощности, а также характеристик ТНУ и ГТО в составе энергокомплекса АГРС-НП с ВИЭ в зависимости от соотношения мощностей базового и пикового подогревателей при заданных параметрах технологического газа: перед турбиной ДГА (давление газа — 4,5 МПа, температура газа — 0°C); за турбиной ДГА (давление газа — 1,2 МПа, минимально допустимое значение температуры газа — 5°C). Результаты расчётов приведены в табл.1 и на рис. 4.

При поиске минимума капитальных затрат на создание энергокомплекса АГРС-

НП с ВИЭ использованы значения удельных затрат на оборудование по данным [4, 5, 7, 10], которые приведены в табл. 2.

Анализ результатов расчётных режимов функционирования АГРС-НП с ВИЭ позволил определить оптимальное соотношение мощностей базового и пикового подогревателей газа как 0,4 и 0,6, соответственно, по значению критерия оптимизации — минимуму капзатрат на создание энергокомплекса АГРС-НП с ВИЭ.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Создание в перспективе автоматизированных газораспределительных станций нового поколения (АГРС-НП) определяют актуальность устройства надёжных автоматизированных бестопливных систем автономного энергоснабжения ГРС.

Удельные затраты на создание АГРС-НП, использующих ВИЭ табл. 2

Установка (в составе АГРС-НП)	Удельные капитальные затраты, \$/кВт
ДГА	750
ТНУ с ГТО (комплект)	4250
ПКТО	200

2. На основе процессов преобразования энергетических потоков в условиях нестационарного потребления вырабатываемой энергии и поступления возобновляемых энергетических ресурсов, а также статических характеристик оборудования, разработана комплексная имитационная модель, позволяющая:

□ выполнять расчёты и анализ теплового баланса энергетических установок АГРС-НП с ВИЭ;

□ определять расходные и мощностные характеристики энергетического оборудования АГРС-НП с ВИЭ;

□ оптимизировать состав, структуру и режимы функционирования энергетического оборудования АГРС-НП с ВИЭ по выбранному критерию оптимизации.

Анализ результатов моделирования режимов функционирования АГРС-НП с ВИЭ, для рассматриваемого примера, позволил определить оптимальное соотношение мощностей базового и пикового подогревателей газа как 0,4 и 0,6, соответственно, по значению критерия оптимизации — минимуму капитальных затрат на создание энергокомплекса АГРС-НП, использующего ВИЭ. ●

1. Аверьянов В.К., Давыдов О.А., Блинов А.Н., Анисимов С.М. Тенденции развития энергосистем ГРС // Вестник гражданских инженеров, 2019. №2. С. 122–130.
2. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика [Электронный ресурс]. СПб ПУ Петра Великого, 2016. Режим доступа: elib.spbstu.ru. Дата обращения: 02.11.2020.
3. Дистанов Р.Ю., Посмак М.П., Лигачёв А.В. Перспективы развития ГРС ПАО «Газпром» // Территория «Нефтегаз», 2016. №12. С. 34–38.
4. 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.
5. Фокин Г.А. Методология создания автономных турбинных источников электрической энергии, использующих энергию сжатого природного газа для собственных нужд газотранспортной системы России: Дисс. доктора техн. наук по спец. 05.04.12. — СПб.: СПб ПУ Петра Великого, 2015. 456 с.

6. Кротов В.М. Совершенствование методики расчёта первичного контура систем теплоснабжения, использующих низкопотенциальную теплоту грунта: Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.23.03. — Тюмень: ТюмГАСУ, 2011. 139 с.
7. Журмилова И.А. Совершенствование систем тепло- и холодообеспечения зданий с применением грунтовых теплообменников: Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.23.03. — Владивосток: ДВФУ; ПГУАС, 2016. 155 с.
8. Сапрыкина Н.Ю., Панов М.Я. Исследование изменения температурного поля грунтового массива при воздействии циклическим знакопеременным тепловым потоком // Научный журнал строительства и архитектуры, 2018. №4. С. 117–127.

9. Патент РФ №2150641. МПК 7 F25 В 11/02, F 01 К 27/00. Способ работы детандерной установки и устройство для его осуществления / Агабабов В.С. Заявл.: 15.06.1999; опубл.: 10.06.2000. Бюл. №16.
10. Байдакова Ю.О. Исследование эффективности схем бестопливных установок генерации электроэнергии на основе детандер-генераторных агрегатов и тепловых насосов: Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.14.01. — М.: ОАО «ВТИ»; НИУ «МЭИ», 2013. 155 с.
11. Филатов С.О. Влияние теплофизических характеристик грунта на размеры вертикальных грунтовых теплообменников тепловых насосов // Холодильщик (holodilshchik.ru), 2013. №12(108).

References — see page 79.

Autonomous power supply to a gas distribution station using alternative energy sources. Pp. 64–69.

Vladimir K. Averyanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, adviser to the general director of "Gazprom Promgaz", JSC; **Oleg A. Davydov**, an engineer, deputy general director for construction of infrastructure facilities of "Rochemolles", LLC; **Viktor V. Elistratov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, director of the "Renewable Energy and Installations Based on Them" Research and Educational Center; **Sergey N. Kiryukhin**, PhD, Associate Professor, deputy head of the department of "Gazprom Promgaz", JSC

1. V.K. Aver'janov, O.A. Davydov, A.N. Blinov, S.M. Anisimov. *Tendencii razvitiya jenergeticheskikh sistem gazoraspredeletel'nykh stancij* [Trends in the development of energy systems of gas distribution stations]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* ["Bulletin of civil engineers" Magazine]. 2019. No. 2. Pp. 122–130. [In Russian]
2. V.V. Elistratov. *Vozobnovljajemaja jenergetika* [Renewable energy]. *SPb PU Petra Velikogo* [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. 2016. Web-source: elib.spbstu.ru. Access data: November 2, 2020. [In Russian]
3. R.Ju. Distanov, M.P. Posmak, A.V. Ligachev. *Perspektivy razvitiya gazoraspredeletel'nykh stancij PAO "Gazprom"* [Prospects for the development of gas distribution stations of "Gazprom", PJSC]. *Territorija "Neftegaz"* ["The "Oil and gas" territory" Magazine]. 2016. No. 12. Pp. 34–38. [In Russian]
4. V.S. Agababov, U.I. Smirnova, A.M. Kolosov. *Ocenka jeffektivnosti raboty bestoplivnykh jergogenerirujushchih ustanovok dlja proizvodstva jelektroenergii v sisteme gazosnabzhenija* [Evaluation of the efficiency of fuel-free power generating plants for the production of electricity in the gas supply system]. *Vestnik MJeI* [Bulletin of Moscow Power Engineering Institute]. 2010. No. 2. Pp. 15–20. [In Russian]
5. G.A. Fokin. *Metodologija sozdaniya avtonomnykh turbinnykh istochnikov jelektricheskoi jenerгии, ispol'zujushchih jenergiyu szhatogo prirodnogo gaza dlja sobstvennykh nuzhd gazotransportnoj sistemy Rossii* [Methodology for creating autonomous turbine sources of electrical energy using compressed natural gas energy for the own needs of the gas transmission system of Russia]. *The dissertation of the doctor of technical sciences in the specialty No. 05.04.12*. St. Petersburg. *SPb PU Petra Velikogo* [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. 2015. 456 p. [In Russian]
6. V.M. Krotov. *Sovershenstvovanie metodiki rascheta pervichnogo kontura sistem teplosnabzhenija, ispol'zujushchih nizkopotencial'nuju teplotu grunta* [Improving the methodology for calculating the primary circuit of heat supply systems using low-potential soil heat]. *The dissertation of the doctor of technical sciences in the specialty No. 05.23.03*. Tyumen. *TjumGASU* [Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering]. 2011. 139 p. [In Russian]
7. I.A. Zhurmilova. *Sovershenstvovanie sistem teplo- i holodosnabzhenija zdaniy s primeneniem gruntovykh teploobmennikov* [Improvement of heat and cold supply systems for buildings using ground heat exchangers]. *The dissertation of the doctor of technical sciences in the specialty No. 05.23.03*. Vladivostok. *DVFU* [Vladivostok Far Eastern Federal University]. *PGUAS* [Penza State University of Architecture and Construction]. 2016. 155 p. [In Russian]
8. N.Ju. Saprykina, M.Ja. Panov. *Issledovanie izmenenija temperaturnogo polja gruntovogo massiva pri vozdejstvii ciklicheskim znakoperemennym teplovym potokom (regeneracija temperaturnogo polja)* [Investigation of changes in the temperature field of a soil massif under the influence of a cyclic alternating heat flow (regeneration of the temperature field)]. *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury* [Scientific journal of construction and architecture]. 2018. No. 4. Pp. 117–127. [In Russian]
9. The patent of Russia No. 2150641. IPC 7 F25 V 11/02, F 01 K 27/00. *Sposob raboty detandornoj ustanovki i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [Method of operation of the expander plant and device for its implementation]. V.S. Agababov. Appl. and patent holder: NIU "MJeI" [National Research University "Moscow Power Engineering Institute"]. No. 99113159/06. Decl.: June 15, 1999. Publ.: June 10, 2000. Bull. No. 16. [In Russian]
10. Ju.O. Bajdakova. *Issledovanie jeffektivnosti shem bestoplivnykh ustanovok generacii jelektroenergii na osnove detander-generatornykh agregatov i teplovykh nasosov* [Investigation of the efficiency of schemes of fuel-free power generation units based on expander-generator units and heat pumps]. *The dissertation of the doctor of technical sciences in the specialty No. 05.14.01*. Moscow. *OAO "VTI"* [All-Russian Thermal Engineering Research Institute]. *NIU "MJeI"* [National Research University "Moscow Power Engineering Institute"]. 2013. 155 p. [In Russian]