

DOI 10.5862/JEST/9

УДК 620.9

С.В. Жавроцкий, А.С. Стребков, А.В. Осипов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ИЗЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ТОПЛИВНОГО ГАЗА В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ДЕТАНДЕРЕ

S.V. Zhavrockij, A.S. Strebkov, A.V. Osipov

IMPROVING THE EFFICIENCY UTILIZATION OF FUEL GAS EXCESS PRESSURE IN TWO-STAGE EXPANDER

Выполнена оценка энергетической эффективности использования силового потенциала топливного газа при применении последовательно-параллельной схемы работы цилиндров детандер-генераторного агрегата, работающего в составе двухцилиндровой утилизационной турбодетандерной установки. Показано, что путем переключения с параллельной схемы работы установки на последовательную при определенных условиях достигается дополнительная выработка электрической энергии и, таким образом, более полное использование энергии избыточного давления газа.

ТУРБОДЕТАНДЕРНЫЙ АГРЕГАТ; ПЕРЕМЕННЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ; ДРОССЕЛИРОВАНИЕ; ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ; ТОПЛИВНЫЙ ГАЗ; ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ; ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ СХЕМА.

The study considers the feasibility of applying the expander-generating units for the electric energy production instead of throttle pressure regulators. The research shows the importance of the influence of the operating parameters of the gas supply system and their changes in the electric energy quantitative estimation produced by the expander-generator unit. Such parameters are gas pressure in the supply pipeline and a gas flow rate through the expander. The study shows that the regulation of the expander-generator unit is provided in varying degrees of throttling the gas flow while reducing gas consumption. Periodic changes of pressure in the main gas pipeline and the gas flow result in the need to use the throttle gas regulator in front of the expander. Consequently, this fact reduces the efficiency of the expander-generator unit installed on gas-distributing stations or gas control point. The proposed series and parallel two-cylinder utilization expander unit provides the ability to limit the throttling process in the regulation of plant operation. As a result, this allows increasing the electric energy production and making a better use of the energy of excess gas pressure. Among the benefits of this study, by switching from a parallel circuit to a series circuit, there are additional electric energy generation and better utilization of energy excess gas pressure which are achieved under certain conditions.

TURBOEXPANDER UNIT; VARIABLE MODE; THROTTLE RESPONSE; ENERGY EFFICIENCY; FUEL GAS; ELECTRIC ENERGY PRODUCTION; SERIES AND PARALLEL CIRCUIT.

Введение

Система магистрального трубопроводного транспорта топливного газа обладает значительным энергетическим потенциалом, который обусловлен высокими уровнями расхода и давления газа. Соотношение давлений газа в магистральных газопроводах на входе в газо-

распределительные станции (ГРС) и газорегуляторные пункты (ГРП) и на выходе из них, качественно определяющее величину силового потенциала топливного газа, может достигать 5–10. Энергия избыточного давления потока топливного газа диссипируется в клапанах дроссельных регуляторов, установленных в пунктах снижения давления газа, без совершения по-

лезной работы. Альтернативой дроссельным регуляторам давления может служить детандер-генераторный агрегат (ДГА) турбинного типа, в котором процесс расширения газового потока сопровождается производством электроэнергии.

Исследования и разработки детандер-генераторных агрегатов и научно-технические решения, связанные с полезным использованием силового потенциала топливного газа, достаточно отражены в отечественной и зарубежной литературе. В работе [1] речь идет об исследовании термодинамической эффективности использования утилизационных турбодетандерных установок (УТДУ), преобразующих энергию избыточного давления транспортируемого природного газа в электрическую энергию, и полезного эффекта в виде экономии топлива, возникающего при комбинированном производстве электроэнергии традиционными источниками и турбодетандерными агрегатами. Ряд работ посвящен оценке влияния УТДУ на экономичность тепловых электростанций. Исследуется влияние включения детандер-генераторных агрегатов в тепловые схемы КЭС и ТЭЦ [2, 3]. Большое внимание исследователей сконцентрировано на вопросах, связанных с определением наиболее эффективных способов подогрева газа в УТДУ. Подогрев газа производится за счет следующего: теплоты сетевой воды; отборного пара; теплоты отходящих газов; теплоты, вырабатываемой автономным водогрейным котлом; теплоты, получаемой в конденсаторе теплонасосной установки; вторичных тепловых энергетических ресурсов; возобновляемых источников энергии [4–16]. В работах [17–24] приводятся принципиальные схемы детандер-генераторных агрегатов и энергетических установок, тепловые схемы которых включают в себя ДГА.

В упомянутых работах не были затронуты или оказались недостаточно освещенными вопросы оценки энергетической эффективности работы УТДУ в условиях сезонных изменений режимов системы газоснабжения. Между тем количество произведенной ДГА электрической энергии и, как следствие, полнота утилизации силового потенциала топливного газа, а также энергетическая эффективность ДГА в значительной степени зависят от режима работы системы газоснабжения, по которой топливный газ

транспортируется потребителю [25–27]. В условиях изменяющихся расходов газа через ГРС или ГРП и нестабильного давления в питающем магистральном газопроводе режим работы ДГА может значительно отклоняться от оптимального, что сопровождается снижением внутреннего перепада энтальпий и выработки электроэнергии. Как показано в [25], работа одноцилиндрового ДГА в составе УТДУ на режимах с относительно малыми расходами газа через проточную часть турбодетандера не обеспечивает максимальной выработки электроэнергии, так как снижение расхода газа влечет за собой неизбежное падение внутреннего перепада энтальпий из-за необходимости использовать дросселирование потока газа перед турбодетандером.

Существенное влияние на энергетическую эффективность производства электроэнергии УТДУ оказывает ее конфигурация. Известны различные схемы компоновки ДГА, предусматривающие работу агрегата как по параллельной схеме, так и по последовательной [28–30]. В этих работах не обсуждается эффективность функционирования ДГА на переменных режимах его работы, а следовательно, из поля зрения выпадает вопрос о достижении максимальной выработки электроэнергии ДГА.

В условиях изменения расхода газа через агрегат и наличия периодических изменений уровня давления в питающем магистральном газопроводе, к которому подключен детандер, происходит значительное снижение выработки электроэнергии на переменных режимах работы агрегата. Особенно это актуально в ситуации, когда имеет место сочетание относительно низких расходов газа через детандер и относительно высоких давлений газа на входе в детандер. Причина снижения эффективности ДГА турбинного типа на режимах его работы с малыми расходами газа заключается в необходимости дросселирования потока газа перед детандером, что в известной мере обесценивает саму идею замещения дроссельного регулятора детандер-генераторным агрегатом.

В работе [31] была исследована схема генерации электроэнергии в двухцилиндровой УТДУ с параллельной схемой работы цилиндров. Показано, что на некоторых переменных режимах работы установки удастся несколько повысить ее мощность и выработку ею электроэнергии по

сравнению с одноцилиндровой установкой, что достигается за счет редуцирования не всего потока газа, а лишь его меньшей части. Однако при значительном сокращении расхода газа через УТДУ приходится использовать дросселирование по обоим потокам газа, направляемым в цилиндры ДГА, а значит, и параллельная компоновка не позволяет избежать падения суммарной выработки электроэнергии.

Целью нашей работы является проверка гипотезы о целесообразности замещения дроссельного регулятора дополнительным цилиндром турбодетандера. Основания для данной гипотезы дают периодические изменения давления в питающем магистральном газопроводе в сочетании необходимостью применять дросселирование на частичных режимах работы ДГА. Дополнительный цилиндр будет работать за время эксплуатации лишь эпизодически, а между тем наличие третьего цилиндра усложнит и удорожит конструкцию установки. Проблема может быть решена, если от параллельной компоновки цилиндров перейти к последовательной. В этом случае малозагруженный по расходу газа цилиндр ДГА, давление перед которым значительно снижено дроссельным регулятором, предвключается последовательно с основным цилиндром таким образом, что весь расход газа (сокращенный от номинального) проходит через оба цилиндра ДГА. Таким образом, в настоящей работе предлагается последовательно-параллельная схема ДГА, которая до известной степени позволяет ограничить применение дросселирования при регулировании мощности установки. Цилиндры ДГА работают по параллельной схеме на режимах, характеризующихся относительно большими расходами газа через установку. Последовательное же включение цилиндров используется в условиях относительно малых расходов, когда имеется достаточно высокое давление газа в питающем газопроводе, чтобы обеспечить этот расход через оба цилиндра ДГА.

Схема турбодетандерной установки и ее рабочие параметры

На рис. 1 представлена принципиальная схема предлагаемой установки.

При работе УТДУ по параллельной схеме на режимах с большим потреблением газа общий газ, проходящий через ГРС, разделяется на два параллельных потока, каждый из которых после

предварительного подогрева в теплообменниках 3 и 4 поступает в цилиндры 1 и 2 детандера. Дроссельные регуляторы давления газа 5 и 6 поддерживают на заданном уровне давление газа на выходе цилиндров детандера. Для организации параллельной работы цилиндров детандера задвижка 7 открывается, а задвижка 8 закрывается. Таким образом, поток газа с заданным давлением поступает в газопровод сниженного давления 9, следуя к потребителю.

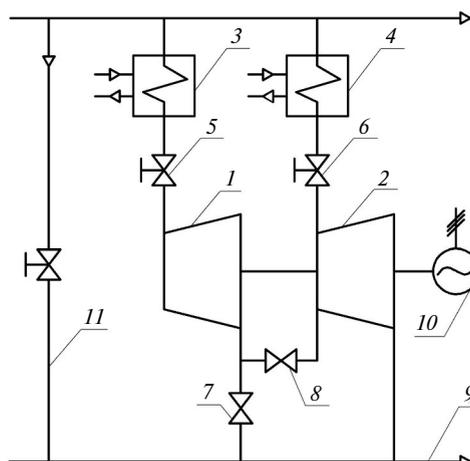


Рис. 1. УТДУ с последовательно-параллельной схемой работы цилиндров:
1 — регулирующий цилиндр; 2 — основной цилиндр;
3, 4 — подогреватели газа; 5, 6 — дроссельные регуляторы давления газа; 7, 8 — задвижки;
9 — газопровод сниженного давления газа; 10 — электрогенератор; 11 — байпасная линия (ГРС)

При последовательной работе цилиндров 1 и 2 детандера на режимах сниженного потребления газа поток топливного газа из газопровода высокого давления, предварительно подогретый в теплообменнике 3, направляется сначала в цилиндр 1, а затем по промежуточному трубопроводу в цилиндр 2 и далее в газопровод сниженного давления 9. Поддержание заданного давления на выходе УТДУ обеспечивается дроссельным регулятором давления 5. Организация последовательной работы цилиндров детандера обеспечивается открытием задвижки 8, закрытием задвижки 7, при этом газопровод с подогревателем 4 закрывается с помощью запорной арматуры (на схеме не показана).

Подогретый газ расширяется в цилиндрах детандера с совершением механической работы, которая в электрогенераторе 10 преобразуется в электрическую энергию, отдаваемую в электри-

ческую сеть. Установка включается параллельно с байпасной линией // снижения давления газа.

При проведении расчетов, как и в работе [31], было принято, что номинальному режиму каждого из двух цилиндров ДГА соответствует расход газа, равный 25625 нм³/ч. При параллельной схеме работы цилиндр 2 (см. рис. 1) принят базовым, он работает с возможно более полным расходом газа, а цилиндр 1 — регулирующим с минимальным расходом в 40 % от номинального значения. Данное ограничение по расходу газа в цилиндр ДГА обусловлено необходимостью его вентиляции и исключения перегрева элементов конструкции цилиндра. Таким образом, снижение расхода газа через УТДУ производится за счет изменения его пропуска сначала только через регулирующий цилиндр, а затем, по мере дальнейшего снижения расхода, за счет сокращения пропуска газа в базовый цилиндр при постоянном (минимальном) расходе газа в регулирующий цилиндр. При последовательной схеме поток газа поочередно следует в цилиндр 1, затем в цилиндр 2.

Балансовые расчеты переменных режимов работы УТДУ выполнялись на основе модели [25, 32], базирующейся на уравнении Стодолы — Флюгеля для определения относительного расхода газа в цилиндры ДГА и методике определения термодинамических свойств метана. Вычисления относительного расхода газа через турбодетандер на переменных режимах его работы производились по выражению [33]

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{T_{1н}}{T_1}} \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{P_{1н}^2 - P_{2н}^2}},$$

где \bar{G} — относительный расход газа через цилиндр турбодетандера; $P_{1н}$, $P_{2н}$, $T_{1н}$ — соответственно номинальные начальное и конечное давления и начальная температура; P_1 , P_2 , T_1 — те же параметры на переменных режимах. Для оценки электрической мощности УТДУ использовалось выражение

$$N = G_H \bar{G} \Delta h_0 \eta_{oi} \eta_{эм},$$

где N — электрическая мощность установки, кВт; G_H — массовый расход газа, кг/с; Δh_0 — изоэнтропийный перепад энтальпий, кДж/кг; η_{oi} — относительный внутренний КПД; $\eta_{эм}$ — электромеханический КПД. Согласно методике

[32] расчет энтальпии и энтропии газа производился в зависимости от его давления и температуры с учетом коэффициента сжимаемости и поправок на отклонение от идеально-газового состояния.

Выражения для определения фактора сжимаемости, энтальпии, кДж/кг, и энтропии, кДж/(кг·К), метана соответственно имеют вид

$$z = 1 + A_0;$$

$$h = h_0 + RTA_3;$$

$$s = s_0 - \frac{R}{10^3} \left[\ln \frac{p}{z p_{ст}} - A_4 \right],$$

где $p_{ст} = 0,101324$ МПа, p — в МПа.

Формула для расчета энтальпии метана в идеально-газовом состоянии, кДж/кг:

$$h_0 = 572,6 + \frac{R}{10^3} \left[\sum_{j=0}^{10} \frac{\alpha_j (T^{j+1} - 100^{j+1})}{(j+1)100^j} + \left(100\beta_1 (\ln T - \ln 100) + \sum_{j=2}^6 \beta_j \frac{100^j}{j-1} \left(\frac{1}{100^{j-1}} - \frac{1}{T^{j-1}} \right) \right) + 398,23 \right].$$

Формула для расчета энтропии метана в идеально-газовом состоянии, кДж/(кг·К):

$$s_0 = \frac{R}{10^3} \left[\left(\alpha_0 (\ln T - \ln 100) + \sum_{j=1}^{10} \frac{\alpha_j}{100^j} \cdot \frac{T^j - 100^j}{j} \right) - \sum_{j=1}^6 \beta_j \frac{100^j}{j} \left(\frac{1}{T^j} - \frac{1}{100^j} \right) + 17,9779 \right].$$

В этих выражениях коэффициенты A_0 , A_3 и A_4 выражаются формулами

$$A_0 = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=0}^{S_i} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j}; \quad A_3 = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=0}^{S_i} \frac{i+j}{i} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j};$$

$$A_4 = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=0}^{S_i} \frac{j-1}{i} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j},$$

содержащими приведенные плотности ω и температуры τ , а также эмпирическими коэффи-

циентами b , α , β методики [32] с соответствующими индексами:

$$\omega = \frac{\rho}{\rho_{кр}}, \text{ где } \rho_{кр} = 163,5 \text{ кг/м}^3;$$

$$\tau = \frac{T}{T_{кр}}, \text{ где } T_{кр} = 190,77 \text{ К};$$

$$\rho = \frac{p}{zRT}, \text{ где } R = 518,271 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Вычисления производились с соблюдением следующих условий: для каждого из цилиндров ДГА номинальные начальное и конечное давления, номинальная начальная температура имели соответственно значения $P_{1н} = 3,5 \text{ МПа}$, $P_{2н} = 0,5 \text{ МПа}$, $T_{1н} = 391,4 \text{ К}$; номинальный внутренний относительный КПД $\eta_{oi}^H = 0,8$; условие полной экологичности работы УТДУ — на выходе установки температура газа на всех переменных режимах составляет $+5^\circ\text{C}$.

Верификация эффективности предложенной схемы УТДУ

На сезонные циклы изменения давления и потребления газа (если еще учесть, что на них накладываются календарные и суточные изменения) действует множество факторов. Чтобы

верифицировать гипотезу наличия полезного эффекта от использования последовательно-параллельной схемы УТДУ, были просчитаны две крайние условные ситуации амплитудно-фазового асинхронизма расходов газа и давления в магистральном газопроводе, который может приводить к появлению случаев, когда амплитуды давления газа в магистральном газопроводе и его расхода могут совпадать или не совпадать по времени.

На рис. 2 показаны графики годового потребления газа потребителями, подключенными к ГРС, снабженной УТДУ, и периодические изменения уровня давления газа в питающем магистральном газопроводе.

Условию «А» соответствует режим работы системы газоснабжения, при котором, с одной стороны, пик потребления газа по времени примерно соответствует появлению максимального давления газа в магистральном газопроводе; с другой стороны, минимальные расходы газа через ГРС соответствуют минимальным давлениям газа в питающем газопроводе, рост и снижение обоих этих параметров происходит более или менее синхронно. Условие «Б» являет собой зеркальную противоположность условию «А». В этом случае наблюдается диаметрально расхождение максимумов и минимумов потребления

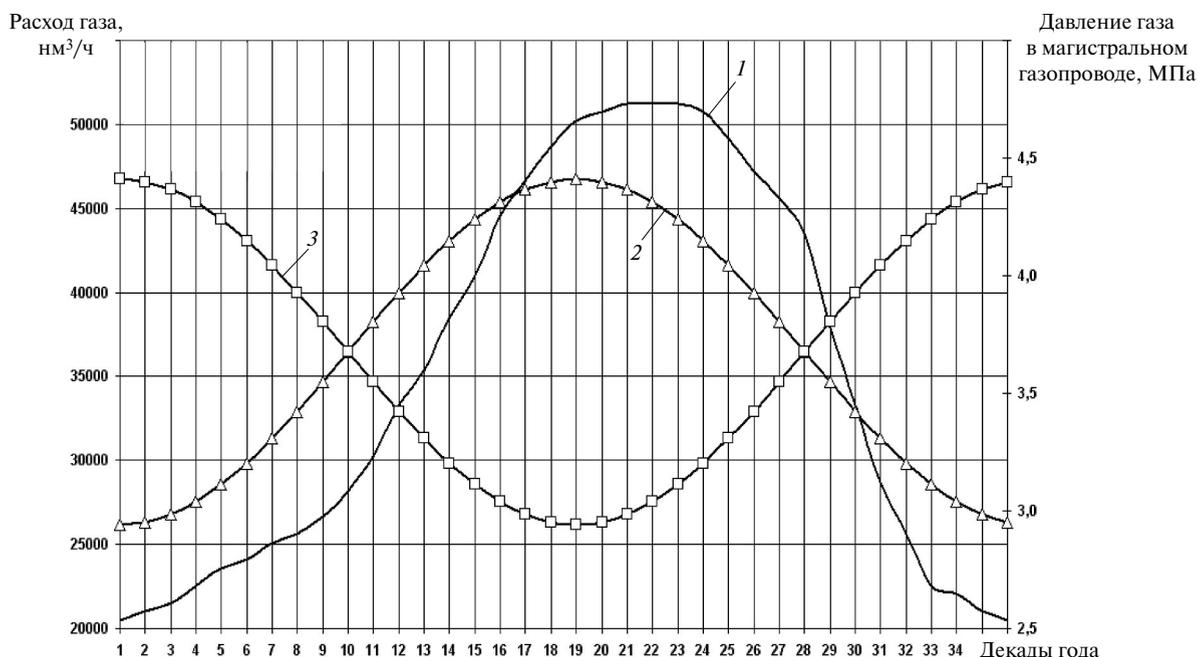


Рис. 2. Расход газа через ГРС (1) в течение года и периодические изменения уровня давления (2 — при условии А; 3 — при условии Б) в магистральном газопроводе

газа и его давления в магистральном питающем газопроводе. На основе данных рис. 1 построены графики выработки электроэнергии УТДУ, представленные на рис. 3 и 4.

В таблице показана выработка электроэнергии УТДУ, работающими по параллельной и последовательно-параллельной схемам, а также прирост выработки в последнем случае.

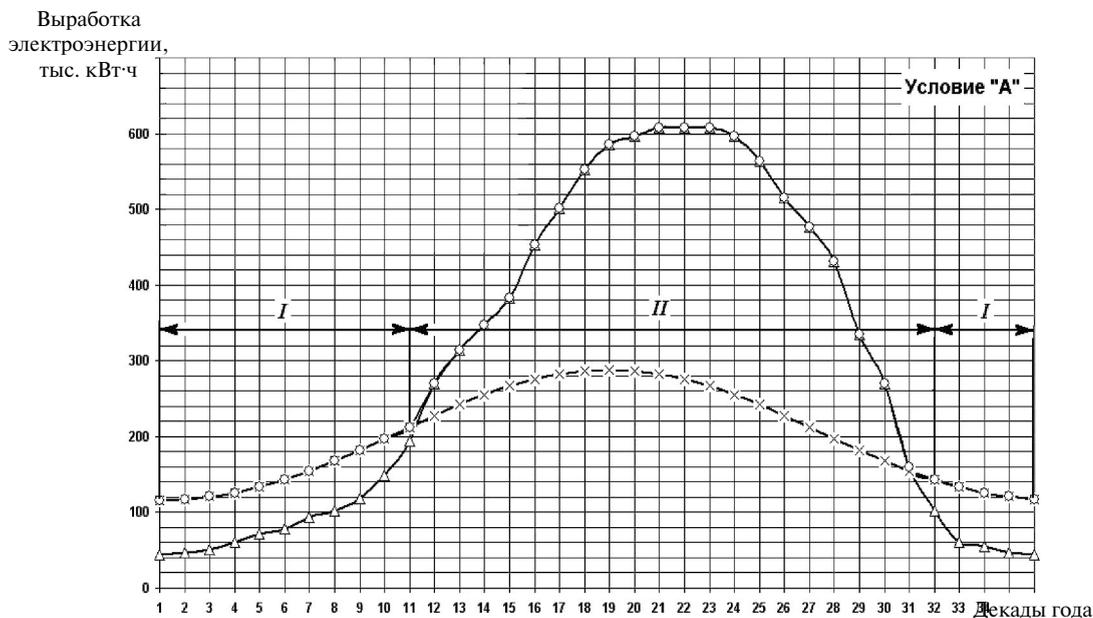


Рис. 3. Выработка электроэнергии УТДУ при их двухцилиндровой компоновке, работающими по параллельной (—Δ—), последовательной (—×—) и последовательно-параллельной (—o—) схемам при условии «А» (I — работа УТДУ по последовательной схеме; II — работа УТДУ по параллельной схеме)

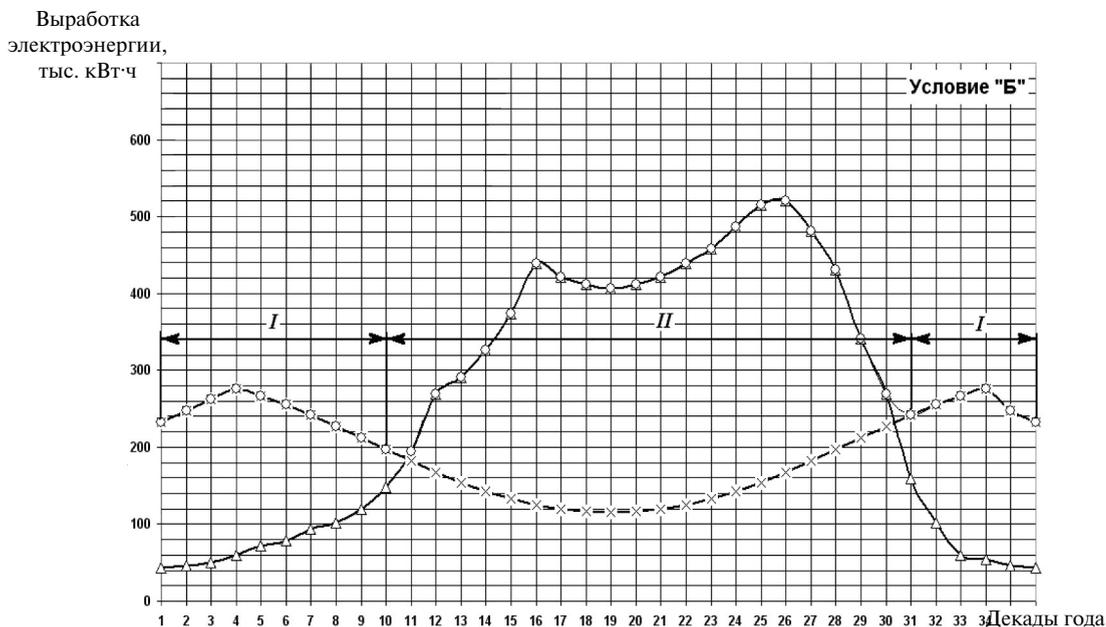


Рис. 4. Выработка электроэнергии УТДУ при их двухцилиндровой компоновке, работающими по параллельной (—Δ—), последовательной (—×—) и последовательно-параллельной (—o—) схемам при условии «Б» (I — работа УТДУ по последовательной схеме; II — работа УТДУ по параллельной схеме)

**Сравнительная выработка электроэнергии УТДУ,
работающими по параллельной и последовательно-параллельной схемам**

| Месяц | Выработка электроэнергии УТДУ, работающей по параллельной схеме, тыс. кВт·ч | | Выработка электроэнергии УТДУ, работающей по последовательно-параллельной схеме, тыс. кВт·ч | | Прирост выработки электроэнергии, тыс. кВт·ч | |
|--------------|---|-------------|---|-------------|--|-------------|
| | Условие «А» | Условие «Б» | Условие «А» | Условие «Б» | Условие «А» | Условие «Б» |
| Январь | 141,044 | 141,044 | 354,780 | 742,884 | 213,736 | 601,840 |
| Февраль | 210,363 | 210,363 | 401,272 | 797,431 | 190,909 | 587,068 |
| Март | 314,085 | 314,085 | 503,333 | 681,811 | 189,248 | 367,726 |
| Апрель | 612,864 | 612,864 | 679,079 | 661,005 | 66,215 | 48,141 |
| Май | 1044,317 | 992,201 | 1044,317 | 992,201 | 0 | 0 |
| Июнь | 1507,786 | 1271,015 | 1507,786 | 1271,015 | 0 | 0 |
| Июль | 1789,966 | 1238,697 | 1789,966 | 1238,697 | 0 | 0 |
| Август | 1810,817 | 1384,183 | 1810,817 | 1384,183 | 0 | 0 |
| Сентябрь | 1556,052 | 1516,275 | 1556,052 | 1516,275 | 0 | 0 |
| Октябрь | 1035,297 | 1041,813 | 1035,297 | 1041,813 | 0 | 0 |
| Ноябрь | 321,247 | 321,221 | 435,415 | 763,898 | 114,168 | 442,677 |
| Декабрь | 145,467 | 145,467 | 363,871 | 755,554 | 218,404 | 610,087 |
| Итого за год | 10489,305 | 9189,228 | 11481,985 | 11846,767 | 992,68 | 2657,539 |

Из таблицы, а также рис. 3 и 4 видно, что прирост выработки электроэнергии УТДУ, работающей при условии «А» по последовательно-параллельной схеме в сравнении с чисто параллельной схемой работы составил около 9,5 %, а в сравнении с чисто последовательной — около 60 %. Соответствующие показатели при условии «Б» составляют 28,9 % и 70 %. При этом удельные затраты теплоты на производство электроэнергии в УТДУ, работающей по последовательно-параллельно схеме, практически не изменились по сравнению с аналогичными показателями УТДУ, работающей по параллельной схеме [31], и составили 165,55 и 162,46 г. т/(кВт·ч) соответственно в условиях «А» и «Б».

Предлагаемая схема основывается на байпасном способе регулирования, характерном для паровых турбин. Так, при параллельной работе «байпас» открыт, т. е. каждый из двух потоков газа минует сопротивление одного из цилиндров и поступает только в один из них. При последо-

вательной работе цилиндров ДГА «байпас» закрывается и относительно небольшой расход газа поочередно следует через оба цилиндра. В последнем случае основная мощность вырабатывается во втором по ходу газа цилиндре, в то время как в первом цилиндре производится дополнительная мощность, которая составляет меньшую часть суммарной мощности ДГА.

Особенность применения байпасной схемы регулирования ДГА состоит в наличии однозначной связи между расходом газа и внутренним перепадом энтальпий в турбодетандере, что не позволяет рассматривать их как два относительно независимых параметра, влияющих на мощность агрегата, как это допускается при регулировании мощности паровых турбоагрегатов. Отсюда вытекает задача, которую решает предлагаемая схема: не допустить сильного снижения внутреннего перепада энтальпий при уменьшении расхода газа через ДГА. На частичных режимах работы последовательное включение цилин-

дров ДГА позволяет сбрасывать большой внутренний перепад энтальпий и соответственно развивать большую мощность.

Выводы

В условиях изменения расхода газа через установку, что обусловлено сезонными и технологическими особенностями промышленного и коммунального потребления газа, и наличия периодических изменений уровня давления в питающем магистральном газопроводе параллельное включение цилиндров ДГА обеспечивает достаточно высокую выработку электроэнергии на режимах с относительно высокими расходами газа через цилиндры детандера. Последовательное включение цилиндров ДГА позволяет увеличить выработку электроэнергии на режимах работы установки с относительно малыми расходами газа через цилиндры детандера. Таким образом, переключение УТДУ с параллельной схемы работы на последовательно-параллельную позволяет значительно увеличить выработку

электроэнергии на режимах с относительно малыми расходами газа при наличии достаточного давления в питающем магистральном газопроводе.

Обнаруженный значительный полезный эффект в виде дополнительной выработки электроэнергии ДГА и наличия длительного промежутка времени, при котором УТДУ работает по последовательной схеме (около 45 % длительности эксплуатационной кампании как при условии «А», так при условии «Б»), позволяет предвосхитить дальнейшее направление исследования. Необходимо продолжить исследование энергетической эффективности последовательно-параллельной схемы УТДУ в условиях стохастически изменяющихся режимов потребления газа и периодичности изменения уровня давления газа в питающем магистральном газопроводе, что может быть реализовано посредством компьютерного моделирования и вычислительного эксперимента. Перспективен поиск конструктивных решений, позволяющих реализовать предложенную схему УТДУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трухний А.Д. Термодинамические основы использования утилизационных турбодетандерных установок // Вестник МЭИ. 1999. №5. С. 11–15.
2. Агабабов В.С., Корягин А.В., Агабабов В.В. Изменение удельного расхода условного топлива при включении детандер-генераторного агрегата в тепловую схему конденсационных энергоблоков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2001. №9–10. С. 53–60.
3. Агабабов В.С. Методика оценки влияния детандер-генераторного агрегата на тепловую экономичность ТЭЦ // Вестник МЭИ. 2002. №5. С. 48–52.
4. Агабабов В.С., Галас И.В., Джураева Е.В., Зройченков Н.А., Корягин А.В. Сравнение различных способов подогрева газа в детандер-генераторном агрегате // Теплоэнергетика. 2003. №11. С. 46–50.
5. Агабабов В.С., Корягин А.В., Архарова А.Ю. Подогрев газа перед детандер-генераторным агрегатом с использованием промежуточного теплоносителя на ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. №2(34). С. 34–36.
6. Жигулина Е.В., Калинин Н.В. Хромченков В.Г. Эффективность подогрева природного газа при использовании детандер-генераторных агрегатов на тепловых электрических станциях // Новости теплоэнергетики. 2010. №2. С. 34–37.
7. Агабабов В.С. Подогрев газа в детандер-генераторном агрегате уходящими дымовыми газами энергетических котлов // Энергосбережение и водоподготовка. 2003. №3. С. 46–47.
8. Агабабов В.С., Корягин А.В., Джураева Е.В. Использование теплонасосной установки для подогрева газа перед детандером // Энергосбережение и водоподготовка. 2004. №1. С. 39–41.
9. Джураева Е.В., Александров А.А. Эксергетический анализ процессов, происходящих в детандер-генераторном агрегате // Теплоэнергетика. 2005. №2. С. 73–77.
10. Корягин А.В., Соловьев Р.В. Детандер-генераторный агрегат с двумя промподогревами газа // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. №1–2. С. 47–52.
11. Корягин А.В., Соловьев Р.В. Сравнение схем ДГА с подогревом газа с помощью ТНУ // Труды IV Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение — теория и практика». М.: Изд-во МЭИ, 2008. С. 277–279.
12. Агабабов В.С., Гаряев А.А. Исследование работы ДГА, установленного в системе топливного газа газоперекачивающего агрегата // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. №2(52). С. 39–41.
13. Агабабов В.С., Корягин А.В., Андреев А.Р. Изменение показателей котельных при применении детандер-генераторных агрегатов // Промышленная энергетика. 2004. №7. С. 38–44.
14. Костюченко П.А., Агабабов В.С., Байдакова Ю.О. Повышение эффективности работы бесто-

пливной установки для производства электроэнергии за счет использования ветроэнергетической установки // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. №4(66). С. 22–27.

15. **Байдакова Ю.О., Агабабов В.С., Рогова А.А., Ильина И.П.** Бестопливные установки для совместного производства электроэнергии, теплоты и холода // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. №4(78). С. 66–69.

16. **Агабабов В.С., Смирнова У.И., Байдакова Ю.О., Рогова А.А.** Повышение термодинамической эффективности работы бестопливной установки для производства электроэнергии путем использования энергии возобновляемых источников // Вестник МЭИ. 2012. №4. С. 5–9.

17. **Патент РФ №17971.** Детандер-генераторный агрегат / Агабабов В.С., Корягин А.В., Утенков В.Ф. Приоритет 28.11.2000.

18. **Патент РФ №34990.** Газораспределительная станция с энергетической установкой / Агабабов В.С., Корягин А.В., Александров А.А., Джураева Е.В. Приоритет 21.08.2003.

19. **Патент РФ №36125.** Детандер-генераторный агрегат / Корягин А.В., Агабабов В.С., Джураева Е.В. Приоритет 13.10.2003.

20. **Патент РФ №36126.** Парогазовая станция с дополнительной энергетической установкой / Корягин А.В., Агабабов В.С., Джураева Е.В. Приоритет 13.10.2003.

21. **Патент РФ №39937.** Детандер-генераторная установка / Агабабов В.С., Корягин А.В., Архаров Ю.М., Архарова А.Ю. Приоритет 08.04.2004.

22. **Патент РФ №43345.** Детандер-генераторная установка / Агабабов В.С., Корягин А.В., Архаров Ю.М., Архарова А.Ю. Приоритет 29.09.2004.

23. **Архаров Ю. М., Агабабов В.С., Архарова А.Ю.** Детандер-генераторная установка // Патент РФ №49199. Приоритет 24.05.2005.

24. **Патент РФ №50604.** Энергетическая установка / Архаров Ю.М., Уклечев О.Ю., Костюков И.С., Архарова А.Ю. Приоритет 13.07.2005.

25. **Стребков А.С., Жавроцкий С.В.** Оценка эффективности производства электрической энергии

при использовании силового потенциала топливного газа // Вестник Брян. гос. техн. ун-та. 2013. №4. С. 77–86.

26. **Жавроцкий С.В.** Обеспечение максимальной выработки электроэнергии при использовании силового потенциала топливного газа по результатам моделирования режимов газопотребления цементного завода // Труды IX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика и электротехника, теплофизика и энергосбережение, электроника)»: в 3 т. — Смоленск: Универсум, 2012. Т 2. С. 124–128

27. **Стребков А.С., Осипов А.В., Жавроцкий С.В.** Повышение эффективности использования силового потенциала топливного газа при установке детандерных агрегатов перед горелочными устройствами вращающихся цементобжигательных печей // Вестник Брян. гос. техн. ун-та. 2014. №2. С. 69–74.

28. **Патент РФ №43630.** Детандер-генераторная установка / Агабабов В.С., Корягин А.В., Архарова А.Ю., Андреев А.Р., Фролов Р.И., Малафеева Н.В., Гаряев А.А., Соловьева Е.С. Приоритет 06.10.2004.

29. **Патент РФ №46565.** Установка для получения электроэнергии, теплоты и холода / Агабабов В.С., Архарова А.Ю., Малафеева Н.В. Приоритет 03.02.2005.

30. **Патент РФ №85614.** Детандер-генераторный агрегат с двухступенчатым промежуточным подогревом газа / Корягин А.В., Соловьев Р.В. Приоритет 07.04.2009.

31. **Стребков А.С., Осипов А.В., Жавроцкий С.В.** Влияние конфигурации турбодетандерного оборудования на энергоэффективность использования силового потенциала топливного газа // Вестник Брян. гос. техн. ун-та. 2014. №4. С. 109–113.

32. **Сычев В.В., Вассерман А.А., Загорученко В.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А.** Термодинамические свойства метана. М.: Изд-во стандартов, 1979. 348 с.

33. **Сазанов Б.В., Ситас В.И.** Теплоэнергетические системы промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1990. 304 с.

REFERENCES

1. **Trukhniy A.D.** Termodinamicheskiye osnovy ispolzovaniya utilizatsionnykh turbodetandernykh ustanovok. [The thermodynamic basis for the use of recovery turboexpanders units]. *Vestnik MEI*. 1999. №5. S. 11–15. (rus.)

2. **Agababov V.S., Koryagin A.V., Agababov V.V.** Izmeneniye udelnogo raskhoda uslovnogo topliva pri vkluchenii detander-generatornogo agregata v teplovuyu skhemu kondensatsionnykh energoblokov. [The change in specific consumption of equivalent fuel at inclusion the expander-generator unit in the thermal circuit condensing

units]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2001. №9–10. S. 53–60. (rus.)

3. **Agababov V.S.** Metodika otsenki vliyaniya detander-generatornogo agregata na teplovuyu ekonomichnost TETs. [The methodology of assessing the impact of the expander-generator unit on the thermal efficiency of the CHP]. *Vestnik MEI*. 2002. №5. S. 48–52. (rus.)

4. **Agababov V.S., Galas I.V., Dzhurayeva Ye.V., Zroychenkov N.A., Koryagin A.V.** Sravneniye razlichnykh sposobov podogreva gaza v detander-generatornom agregate.

[Comparison of different methods of heating the gas in the expander-generator unit]. *Teploenergetika*. 2003. №11. S. 46–50. (rus.)

5. **Agababov V.S., Koryagin A.V., Arkharova A.Yu.** Podogrev gaza pered detander-generatornym agregatom s ispolzovaniyem promezhutochnogo teplonositelya na TES. [Heated gas to the expander-generator unit with the use of intermediate heat on TPP]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2005. №2(34). S. 34–36. (rus.)

6. **Zhigulina Ye.V., Kalinin N.V. Khromchenkov V.G.** Effektivnost podogreva prirodnogo gaza pri ispolzovanii detander-generatornykh agregatov na teplovykh elektricheskikh stantsiyakh. [The efficiency of natural gas heating when using the expander-generator units in thermal power plants]. *Novosti teplosnabzheniya*. 2010. №2. S. 34–37. (rus.)

7. **Agababov V.S.** Podogrev gaza v detander-generatornom agregate ukhodyashchimi dymovymi gazami energeticheskikh kotlov. [Heating the gas in the expander-generator unit by the outgoing flue gases of power boilers]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2003. №3. S. 46–47. (rus.)

8. **Agababov V.S., Koryagin A.V., Dzhurayeva Ye.V.** Ispolzovaniye teplona-sosnoy ustanovki dlya podogreva gaza pered detanderom. [The application of the thermal pump for heating the gas before the expander]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2004. №1. S. 39–41. (rus.)

9. **Dzhurayeva Ye.V., Aleksandrov A.A.** Eksergeticheskii analiz protsessov, proiskhodyashchikh v detander-generatornom agregate. [Exergy analysis of processes occurring in the expander-generational unit]. *Teploenergetika*. 2005. №2. S. 73–77. (rus.)

10. **Koryagin A.V., Solovyev R.V.** Detander-generatornyy agregat s dvumya prompodogrevami gaza. [The expander-generator unit with two intermediate gas heating]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2009. №1–2. S. 47–52. (rus.)

11. **Koryagin A.V., Solovyev R.V.** Sravneniye skhem DGA s podogrevom gaza s pomoshchyu TNU. [The DGA schema comparison with the heating gas through TNU]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy shkoly-seminara molodyh uchenykh i specialistov «Jenergoberezhenie — teorija i praktika» [Proceeding of the IV International school-seminar of young scientists and specialists «Energy-theory and practice»]*. Moscow: MEI Publ., 2008. S. 277–279. (rus.)

12. **Agababov V.S., Garyayev A.A.** Issledovaniye raboty DGA, ustanovlennogo v sisteme toplivnogo gaza gazoperekachivayushchego agregata. [The study of the DGA operation installed in the fuel gas system of gas compressor unit]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2008. №2(52). S. 39–41. (rus.)

13. **Agababov V.S., Koryagin A.V., Andreyev A.R.** Izmneniye pokazatelye kotelnykh pri primenenii detander-generatornykh agregatov. [Change boilers indicators when using the expander-generator units]. *Promyshlennaya energetika*. 2004. №7. S. 38–44. (rus.)

14. **Kostyuchenko P.A., Agababov V.S., Baydakova Yu.O.** Povysheniye effektivnosti raboty bestoplivnoy ustanovki dlya proizvodstva elektro-energii za schet ispolzovaniya vetroenergeticheskoy ustanovki. [Improving the efficiency of the fuel-free installations for the production of electric energy through the use of a wind power plant]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2010. №4(66). S. 22–27. (rus.)

15. **Baydakova Yu.O., Agababov V.S., Rogova A.A., Ilina I.P.** Bestoplivnyye ustanovki dlya sovmestnogo proizvodstva elektroenergii, teploty i kholoda. [Fuel-free installations for coproduction of electric energy, heat and cold]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2012. №4(78). S. 66–69. (rus.)

16. **Agababov V.S., Smirnova U.I., Baydakova Yu.O., Rogova A.A.** Povysheniye termodinamicheskoy effektivnosti raboty bestoplivnoy ustanovki dlya proizvodstva elektroenergii putem ispolzovaniya energii vozobnovlyayemykh istochnikov. [Increase the thermodynamic efficiency of the fuel-free installations for the production of electric energy by using renewable energy sources]. *Vestnik MEI*. 2012. №4. S. 5–9. (rus.)

17. **Patent RF №17971.** Detander-generatornyy agregat. [The expander-generator unit]. / Agababov V.S., Koryagin A.V., Utenkov V.F. Prioritet 28.11.2000. (rus.)

18. **Patent RF №34990.** Gazoraspredeletelnaya stantsiya s energeticheskoy ustanovkoy. [Gas distribution station with power unit]. / Agababov V.S., Koryagin A.V., Aleksandrov A.A., Dzhurayeva Ye.V. Prioritet 21.08.2003. (rus.)

19. **Patent RF №36125.** Detander-generatornyy agregat. [The expander-generator unit]. / Koryagin A.V., Agababov V.S., Dzhurayeva Ye.V. Prioritet 13.10.2003. (rus.)

20. **Patent RF №36126.** Parogazovaya stantsiya s dopolnitelnoy energeticheskoy ustanovkoy. [Combined cycle power station with additional power unit]. / Koryagin A.V., Agababov V.S., Dzhurayeva Ye.V. Prioritet 13.10.2003. (rus.)

21. **Patent RF №39937.** Detander-generatornaya ustanovka. [The expander-generator unit]. / Agababov V.S., Koryagin A.V., Arkharov Yu.M., Arkharova A.Yu. Prioritet 08.04.2004. (rus.)

22. **Patent RF №43345.** Detander-generatornaya ustanovka. [The expander-generator unit]. / Agababov V.S., Koryagin A.V., Arkharov Yu.M., Arkharova A.Yu. Prioritet 29.09.2004. (rus.)

23. **Patent RF №49199.** Detander-generatornaya ustanovka. [The expander-generator unit]. / Arkharov Yu. M., Agababov V.S., Arkharova A. Yu. Prioritet 24.05.2005. (rus.)

24. **Patent RF №50604.** Energeticheskaya ustanovka. [The energy unit]. / Arkharov Yu.M., Uklechev O.Yu., Kostyukov I.S., Arkharova A. Yu. Prioritet 13.07.2005. (rus.)

25. **Strebkov A.S., Zhavrotskiy S.V.** Otsenka effektivnosti proizvodstva elektricheskoy energii pri ispolzovanii silovogo potentsiala top-livnogo gaza. [Assessment of

the electric energy production efficiency when using power potential of fuel gas]. *Vestnik BSTU*. 2013. №4. S. 77–86. (rus.)

26. **Zhavrotskiy S.V.** Obespecheniye maksimalnoy vyrabotki elektroenergii pri ispolzovanii silovogo potentsiala toplivnogo gaza po rezultatam modelirovaniya rezhimov gazopotrebleniya tsementnogo zavoda. [Maximizing power generation using power potential of fuel gas according to the results of the simulation regimes of gas consumption of a cement plant]. *Trudy IX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov i aspirantov «Informacionnye tehnologii, jenergetika i jekonomika (jelektrojenergetika i jelektrotehnika, teplofizika i jenergosberezhenie, jelektronika)»*. [Proceedings of IX International scientific and technical conference of students and postgraduates «Information technology, energy and the economy (electricity and electrical engineering, physics and energy-saving, electronics)»]. Smolensk: Universum. 2012. Vol. 2. S. 124–128. (rus.)

27. **Strebkov A.S., Osipov A.V., Zhavrotskiy S.V.** Povysheniye effektivnosti ispolzovaniya silovogo potentsiala toplivnogo gaza pri ustanovke detandernykh agregatov pered gorelochnymi ustroystvami vrashchayushchikhsya tsementoobzhigatelnykh pechey. [The improving of efficiency for using fuel gas power potential when turboexpander units are installed before the burners rotary kilns]. *Vestnik BSTU*. 2014. №2. S. 69–74. (rus.)

28. **Patent RF №43630.** Detander-generatornaya ustanovka. [The expander-generator unit]. / Agababov V.S.,

Koryagin A.V., Arkharova A.Yu., Andreyev A.R., Frolov R.I., Malafeyeva N.V., Garyayev A.A., Solovyeva Ye.S. Prioritet 06.10.2004. (rus.)

29. **Patent RF №46565.** Ustanovka dlya polucheniya elektroenergii, teploty i kholoda. [Installation for producing electric energy, heat and cold]. / Agababov V.S., Arkharova A.Yu., Malafeyeva N.V. Prioritet 03.02.2005. (rus.)

30. **Patent RF №85614.** Detander-generatornyy agregat s dvukhstupenchatym promezhutochnym podogrevom gaza. [The expander-generator unit with two-stage intermediate heating gas]. / Koryagin A.V., Solovyev R.V. Prioritet 07.04.2009. (rus.)

31. **Strebkov A.S., Osipov A.V., Zhavrotskiy S.V.** Vliyaniye konfiguratsii turbodetandernogo oborudovaniya na energoeffektivnost ispolzovaniya silovogo potentsiala toplivnogo gaza. [The influence of turboexpander equipment configuration on energy efficiency of fuel gas power potential using]. *Vestnik BSTU*. 2014. №4. S. 109–113. (rus.)

32. **Sychev V.V., Vasserman A.A., Zagoruchenko V.A., Kozlov A.D., Spiridonov G.A., Tsymarnyy V.A.** Termodinamicheskiye svoystva metana [Thermodynamic properties of methane]. Moscow: Standards Publ., 1979. 348 s. (rus.)

33. **Sazanov B.V., Sitas V.I.** Teploenergeticheskiye sistemy promyshlennykh predpriyatii [Thermal energy systems for industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 304 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖАВРОЦКИЙ Станислав Викторович — инженер по эксплуатации энергооборудования ООО «Сервис Плюс». 241019, г. Брянск, ул. Красноармейская, д. 71. E-mail: Kamakura-Edo@yandex.ru

СТРЕБКОВ Александр Сергеевич — кандидат технических наук доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Брянского государственного технического университета. 241035, г. Брянск, бул. 50-летия Октября, д. 7. E-mail: asstr960@yandex.ru

ОСИПОВ Александр Вадимович — кандидат технических наук доцент кафедры тепловых двигателей Брянского государственного технического университета. 241035, Россия, г.Брянск, бул.50-летия Октября, 7. E-mail: avo-turbo@mail.ru

AUTHORS

ZHAVROCKIJ Stanislav V. — ООО «Servis Pljus». 71, Krasnoarmejskaja St., Bryansk, Russia, 241019. E-mail: Kamakura-Edo@yandex.ru

STREBKOV Aleksandr S. — Bryansk State Technical University. 7, bul. 50-letija Oktjabrja, Brjansk, Russia, 241035. E-mail: asstr960@yandex.ru

OSIPOV Aleksandr V. — Bryansk state technical University. 7, bul.50-letija Oktjabrja, Bryansk, Russia, 241035. E-mail: avo-turbo@mail.ru