

**А. Л. ШУБЕНКО, В. П. САРАПИН, А. В. СЕНЕЦКИЙ, М. В. САРАПИНА**

## **ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ ТУРБОДЕТАНДЕРА И ВОЗДУШНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Предлагается технологическая схема тепло- и электроснабжения газораспределительной станции (ГРС) на основе совместной работы утилизационной турбодетандерной установки (УТДУ) и воздушной климатической системы (ВКС), что позволяет вырабатывать тепловую и электрическую энергию без сжигания топлива. Проведен анализ количества теплоты, необходимой для подогрева помещений ГРС, и возможности отказа от газовых водогрейных котлов. Выполнены оценки вырабатываемой электроэнергии УТДУ при срабатывании перепада давления газа, а также потребности теплоты с целью подогрева газа после расширения в турбодетандере для недопущения снижения температуры газа ниже 0 °С. Построена модель энергоэффективной установки и проведены расчетные исследования, которые показали целесообразность реализации рассматриваемого подхода к решению задачи энергосбережения.

**Ключевые слова:** природный газ, газораспределительная станция, тепловая схема, турбодетандер, воздушная климатическая система, коэффициент рециркуляции, энергосбережение.

**Введение.** В настоящее время потенциальная энергия сжатого природного газа мало используется на узлах редуцирования природного газа [1, 2]. В отдельных случаях, если энергетический потенциал газораспределительной станции (ГРС) либо газораспределительного пункта (ГРП) составляет более 1 МВт, за счет применения утилизационных турбодетандерных установок (УТДУ) при срабатывании избыточного перепада давления природного газа вырабатывается электрическая энергия [1, 2, 3, 4]. В литературе встречаются и другие названия таких установок: утилизационная детандер-энергетическая установка (УДЕУ), турбодетандер энергетический (ТДЭ), детандер-генераторный агрегат (ДГА) и др.[5, 6].

Особенностью получения электрической энергии с помощью таких установок является существенное снижение температуры газа на выходе за счет его расширения, близкого к изэнтропийному. Перепад температур на турбодетандере зависит от перепада давления. Так, при степени расширения 4,16, перепад температур составляет 100 °С, а при степени расширения 5,28–120 °С [7]. Природный газ с отрицательной температурой запрещается подавать в газовую магистраль или к потребителю, чтобы не привести к обмерзанию грунта вдоль трубопровода, выходу из строя газового оборудования, а также выпадению гидратов, увеличивающих эрозионный износ трубопроводов. Учитывая это, для получения максимальной единичной мощности стараются устанавливать УТДУ на ГРС с небольшим перепадом давления и одновременно с большим значением расхода газа.

Полученный холод может использоваться в технологических процессах ГРС, а также для других нужд, например [6, 7, 8, 9]:

- охлаждения газа после сжатия в дожимных компрессорах;
- получения сжиженного природного газа;
- хранения продуктов питания или других веществ и т.д.

В случае невозможности или же нецелесообразности использования холода на ГРС, газ на входе или на выходе с турбодетандера необходимо

подогревать. Максимальная температура газа на входе 100–120 °С, поскольку более высокая температура усложняет теплообменное оборудование и ведет к повышенным энергетическим затратам. С целью нагрева может использоваться тепло от разных источников: от тепловой электрической станции, от газотурбинной установки, от водогрейного котла и др.[10].

Однако имеются узлы редуцирования газа удаленные от источников недорогой тепловой энергии, а также потребителей холода, тогда использовать УТДУ обычной конструкции невозможно.

**Постановка задачи.** На ГРС и ГРП расположены помещения для обслуживающего персонала, операторные с оборудованием, отвечающим за работоспособность редуцирующего узла, и все они нуждаются не только в электроснабжении, но и в обогреве. В основном, для обогрева помещений используются газовые водогрейные котлы, которые сжигают газ для подогрева теплоносителя.

В связи с этим возникает необходимость в разработке нового (рационального) решения для использования потенциала энергии сжатого природного газа с целью покрытия собственных нужд как в электрической, так и в тепловой энергии без использования дополнительных энергоресурсов.

Для решения этих задач необходимо провести анализ количества теплоты необходимого для подогрева помещения, количества вырабатываемой электроэнергии турбодетандерной установкой при срабатывании перепада давления газа, а также количества требуемой теплоты для подогрева газа после расширения в турбодетандере.

Для оценки эффективности предлагаемого решения необходимо выполнить расчетные исследования материально-мощностного баланса схемы, провести расчеты стоимости оборудования, которое предлагается дополнительно установить на ГРС, а также провести расчеты стоимости затрачиваемого количества сжигаемого природного газа в водогрейных котлах, используемых в настоящее время для подогрева помещений.

**Методика проведения расчетных исследований.** Исследования выполнены с помощью программного комплекса разработанного в ИПМаш НАН Украины, позволяющего моделировать тепловые схемы с учетом термодинамических свойств многокомпонентных рабочих тел. Для описания поведения углеводородов используется распространенное уравнение состояния, предложенное Робинсоном и Пенгом в 1974 году (Peng-Robinson) [11, 12]. С учетом характеристик низкокипящих рабочих тел проведены расчетные исследования путем моделирования схем

редуцирования природного газа [13, 14]. Структура построения расчетной модели базируется на общих уравнениях тепловых балансов [15].

**Способ решения задачи энергосбережения.** Для решения поставленной задачи была разработана новая схема (рис. 1), в которой подогрев природного газа на выходе из УТДУ, а также обогрев помещений станции осуществляется за счет воздушной климатической системы, а источником электроэнергии для неё служит УТДУ. В свою очередь УТДУ вырабатывает электроэнергию за счет расширения природного газа.

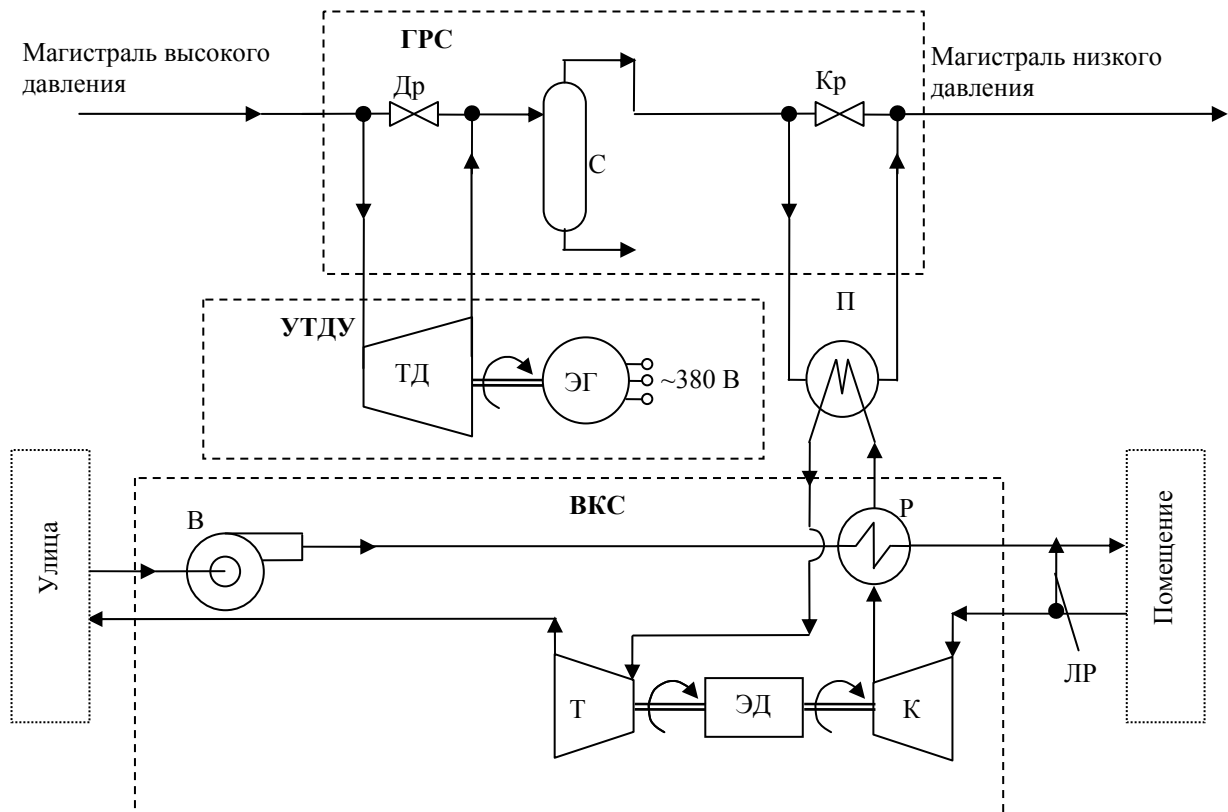


Рис. 1 – Упрощенная схема УТДУ с ВКС для работы на ГРС:

ГРС – газораспределительная станция; УТДУ – утилизационная турбодетандерная установка; ВКС – воздушная климатическая система; Др – дроселирующее устройство; С – сепаратор; Кр – регулирующий кран; П – подогреватель газа; ТД – турбодетандерный агрегат; ЭГ – электрогенератор; В – воздушный вентилятор; Р – рекуператор; Т – воздушная турбина; ЭД – электродвигатель; К – компрессор; ЛР – линия рециркуляции

**Принцип действия.** Природный газ из магистрали высокого давления поступает в турбодетандер, в котором расширяется и тем самым вырабатывает механическую энергию, которая преобразуется в электрическую в электрогенераторе. В процессе расширения газа в турбодетандере выпадает конденсат который отделяется в сепараторе, а сухой газ направляется в подогреватель, в котором подогревается до температуры выше  $0^{\circ}\text{C}$  и затем в магистраль низкого давления. В свою очередь вентилятор воздушной климатической системы подает воздух из атмосферы в рекуператор, в котором он подогревается и затем подается в помещение. Далее воздух из помещения поступает на компрессор, в котором сжимается с повышением температуры, затем в рекуператоре отдает свое тепло атмосферному

воздуху и подается в подогреватель для подогрева природного газа после турбодетандера. Из подогревателя воздух направляется в турбину, в которой расширяется до атмосферного давления и выбрасывается в атмосферу; при расширении воздуха в турбине вырабатывается механическая энергия, которая частично компенсирует мощность вырабатываемую электродвигателем для привода компрессора.

Таким образом, при использовании предлагаемой схемы на ГРС решаются поставленные задачи, а именно: подогрев помещений и природного газа за счет использования ВКС, источником электроэнергии для которой служит УТДУ.

**Пример решения поставленной задачи.** На ГРС Каланчак (Херсонская обл., Украина) для подогрева

помещений используются два котла марки Колви KTH 50 CPM суммарной тепловой мощностью 100 кВт, которые работают 4000 часов в году и потребляют 41 тыс. м<sup>3</sup> природного газа.

При анализе параметров газа по ГРС: давления, температуры и расхода было выяснено, что потенциальная энергия газового потока около 100 кВт. Таким образом, этой электрической мощности достаточно было бы для нагрева отапливаемых помещений с помощью электрических котлов, если не нужно было бы подогревать газ в УТДУ из-за большого редуцирования давления с

5,4 МПа (изб) до 0,3 МПа (изб), что приводит к снижению температуры на 100 °С. Для подогрева газа на 100 °С необходима дополнительная тепловая мощность в количестве 120 кВт. Получение необходимого количества тепловой энергии обеспечивается совместной работой турбодетандера и воздушной климатической системы.

Для параметров этой ГРС при температуре наружного воздуха минус 25 °С проведен тепловой расчет предлагаемой схемы. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчета

Элемент схемы	Наименование	Параметры	
		на входе	на выходе
<b>УТДУ</b>			
Турбодетандер	Расход газа, кг/с	0,615	0,615
	Давление газа, МПа (абс)	5,5	0,41
	Температура газа, °С	10	-99,5
	Вырабатываемая мощность, кВт	112	
Подогреватель	Расход газа, кг/с	0,5816	0,5816
	Давление газа, МПа (абс)	0,41	0,4
	Температура газа, °С	-99,5	0
	Расход воздуха из помещения, кг/с	1,956	1,956
	Давление воздуха из помещения, МПа (абс)	0,195	0,185
	Температура воздуха из помещения, °С	10,4	-52,3
	Тепловая мощность, кВт	120,9	
<b>ВКС</b>			
Вентилятор	Расход атмосферного воздуха, кг/с	1,956	1,956
	Давление атмосферного воздуха, МПа (абс)	0,1	0,105
	Температура атмосферного воздуха, °С	-25	-20,2
	Потребляемая мощность, кВт	9,12	
Рекуператор	Расход атмосферного воздуха, кг/с	1,956	1,956
	Давление атмосферного воздуха, МПа (абс)	0,105	0,1
	Температура атмосферного воздуха, °С	-20,2	73,5
	Расход воздуха из помещения, кг/с	1,956	1,956
	Давление воздуха из помещения, МПа (абс)	0,2	0,195
	Температура воздуха из помещения, °С	103,5	10,4
	Тепловая мощность, кВт	182,1	
Компрессор	Расход воздуха из помещения, кг/с	0,1956	0,1956
	Давление воздуха из помещения, МПа (абс)	0,1	0,2
	Температура воздуха из помещения, °С	22	103,5
	Потребляемая мощность, кВт	159	
Турбина	Расход воздуха из помещения, кг/с	0,1956	0,1956
	Давление воздуха из помещения, МПа (абс)	0,185	0,1
	Температура воздуха из помещения, °С	-52,3	-81,7
	Вырабатываемая мощность, кВт	55,5	
Электродвигатель	Потребляемая мощность, кВт	103,5	
Помещение	Расход воздуха, кг/с*	4,347	4,347
	Давление воздуха, МПа (абс)	0,1	0,1
	Температура воздуха, °С	45,2	22
	Потребление теплоты, кВт	100,4	

*Примечание:* \* расход воздуха при коэффициенте рециркуляции 0,45 (45 % свежего воздуха подаваемого с улицы)

Для регулирования температуры подаваемого воздуха и кратности циркуляции воздуха в помещении в схему введена линия рециркуляции. Зависимость температуры подаваемого воздуха от коэффициента рециркуляции приведена на рис. 2. Под коэффициентом рециркуляции следует понимать

соотношение количества свежего атмосферного воздуха к общему количеству, подаваемому в помещение. Температура подаваемого воздуха в помещении в режиме подогрева должна составлять 30–50 °С [16, 17].

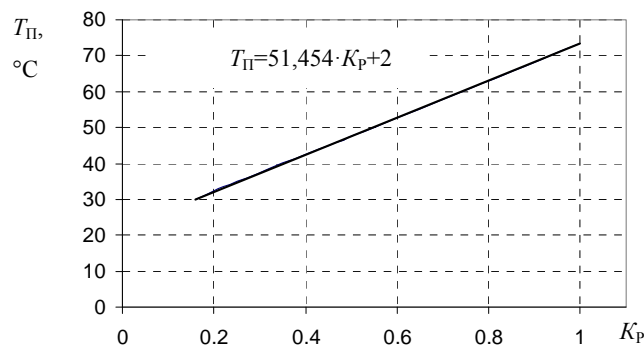


Рис. 2 – Залежність температури подачі від коефіцієнта рециркуляції:  $T_{п}$  – температура повітря подаваного в приміщення,  $K_{р}$  – коефіцієнт рециркуляції

При високих значеннях температури подаваного повітря в приміщення збільшуються теплові втрати і можливі людські травми, а при низьких температурах – збільшується час нагрівання приміщення. Тому цілком природно використовувати середні значення.

В літній час повітряну кліматичну систему можна перевести на охолодження приміщень або вимкнути, тоді вироблявану електроенергію установкою УТДУ можна використовувати на власні потреби або видавати в мережу.

Для оцінки економічної цілісності впровадження пропонуваного обладнання було проведено розрахунок її окупності, при наступних значеннях:

- ціна на природний газ для підприємств за тис. м<sup>3</sup> становить 8900 грн. (356 у.е.);
- вартість пропонуваного обладнання (при масовому виробництві) 2,5 млн. грн. (100 тис. у.е.);
- річне кількість споживаного газу в котлах 41 тис. м<sup>3</sup>;
- вартість споживаного газу в котлах 364900 грн. (14596 у.е.).

Таким чином, на основі розрахуноків за вищезазначеними значеннями отримаємо термін окупності 6,85 років. Якщо врахувати, що в неопалювальний період (160 днів) ВКС працює в режимі кондиціонування приміщень, а надлишки електроенергії, вироблявані УТДУ, будуть використані на власні потреби або видаватимуться в мережу, то термін окупності скоротиться до 4–5 років, залежно від площі охолоджувані приміщень.

#### Висновки.

1. Установка на газорозподільній станції УТДУ разом з повітряною кліматичною системою дозволяє ефективно використовувати енергетичний потенціал стиснутого природного газу для підігрівання приміщень станції і для підігрівання природного газу після турбодетандера без використання додаткових енергоресурсів.

2. Подаваний нагрітий повітря в приміщення завжди більше ніж на 50% є свіжим, що є важливим фактором для будівель, в яких працюють люди.

3. Позитивним ефектом є зниження

точки роси природного газу, через охолодження природного газу в турбодетандері і відбору газового конденсату в сепараторі.

4. Термін окупності пропонуваного рішення в режимі підігрівання (165 днів) і в режимі кондиціонування (160 днів) становить 4–5 років.

5. К недолікам пропонуваної схеми є необхідність установки додаткового обладнання, а також наявності резервного котельного обладнання.

6. В кожному конкретному випадку для інших ГРС необхідно проводити аналогічний розрахунок і вибір параметрів елементів схеми, необхідних для ефективного реалізації пропонуваного рішення.

7. Ключовим аргументом на користь впровадження розробленої схеми на ГРС є забезпечення економії за рахунок суттєвої економії природного газу, а також, що суттєво, підвищення екологічної безпеки ГРС за рахунок запобігання викидів в атмосферний повітря продуктів спалення газових котлів.

**Список літератури:** 1. Степанец А. А. Енергосберегаючі турбодетандерні установки / А. А. Степанец / ред. А. Д. Трухня. – М. : Недр-бізнесцентр, 1999. – 258 с. 2. Воздвиженский М. В. Миллионы киловатт / М. В. Воздвиженский // Изобретатель-рационализатор. – 1984. – № 1. – С. 8–11. 3. Моисеев С. В. Выбор оптимальных номинальных параметров УТДУ для работы на ГРС / С. В. Моисеев, А. В. Буряшев, В. П. Саранин // Наукові праці: Техногенна безпека. – Николаев : ЧДУ ім. П. Могили. – 2007. – Т. 77, № 64. – С. 49–52. 4. Стребков А. С. Оценка эффективности производства электрической энергии при использовании силового потенциала топливного газа / А. С. Стребков, С. В. Жавроцкий // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 4 (40). – С. 77–86. 5. Ситников В. В. Новые детандер-генераторные установки ГП НКПГ «Зоря»-«Машпроект» как один из путей экономии энергетических ресурсов / В. В. Ситников // Наукові праці: Техногенна безпека. – Николаев : ЧДУ ім. П. Могили. – 2006. – Т. 61, № 48. – С. 236–243. 6. Агабабов В. С. Эффективность использования двухступенчатого подогрева газа перед ДГА на ТЭС / В. С. Агабабов, А. В. Корягин, А. Ю. Архарова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2004. – № 4. – С. 70–72. 7. Епифанова В. И. Компрессорные и расширительные турбомашини радиального типа / В. И. Епифанова. – М. : МВТУ ім. Н. И. Баумана, 1998. – 376 с. 8. Язык А. В. Системы и средства охлаждения природного газа / А. В. Язык – М. : Недр, 1986. – 200 с. 9. Бекиров Т. М. Технология обработки газа и конденсата / Т. М. Бекиров, Г. А. Ланчаков. – М. : Недр, 1999. – 596 с. 10. Степанец А. А. Об эффективности детандер-генераторных агрегатов в тепловой схеме ТЭЦ / А. А. Степанец // Энергетик. – 1999. – № 4. – С. 2–4. 11. Peng D. Y.

A new two-constant equation of state / D. Y. Peng, D. B. Robinson // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. – 1976. – № 15. – P. 59–64. **12.** Pedersen K. S. Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids / K. S. Pedersen, P. L. Christensen. – New York : Taylor & Francis Group, 2007. – 423 p. **13.** Taleshian M. Modeling and Power Quality Improvement of Grid Connected Induction Generators Driven by Turbo-Expanders / M. Taleshian, H. Rastegar, H. Askarian Abyaneh // *International Journal of Energy Engineering*. – 2012. – № 2 (4). – P. 131–137. **14.** Babasola A. System Study and CO<sub>2</sub> Emissions Analysis of a Waste Energy Recovery System for Natural Gas Letdown Station Application / A. Babasola. – Kingston : Queen's University Kingston, – 2010. – 141 p. **15.** Лыхвар Н. В. Моделирование теплоэнергетических установок с использованием интерактивной схемной графики / Н. В. Лыхвар, Ю. Н. Говорущенко, В. А. Яковлев // *Пробл. машиностроения*. – 2003. – № 1. – С. 30–41. **16.** Стефанов Е. В. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Е. В. Стефанов. – СПб. : АВОК Северо-Запад, 2005. – 400 с. **17.** Нимич Г. В. Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха / Г. В. Нимич, В. А. Михайлов, Е. С. Бондарь. – Киев : Буд. Аванпост-Прим, 2003. – 626 с.

**References:** 1. Stepanec, A. A. *Energoberegajuschie turbodetandernye ustanovki*. Moscow: Nedra-bisnesscentr, 1999. Print. 2. Vozdvizhenskiy, M. V. "Milliony kilovatt." *Izobretatelj-racionalizator*. No. 1. 1984. 8–11. Print. 3. Moiseev, S. V., A. V. Burnyashchev and V. P. Sarapin. "Vybor optimalnykh nominalnykh parametrov UTDU dlya raboty na GRS." *Naukovi pratsi: Tehnogenna bezpeka*. Vol. 77. No. 64. Nikolaev: ChDU im. P. Mogyilyi, 2007. 49–52. Print. 4. Strebkov, A. S., and S. V. Zhavrotskiy. "Otsenka effektivnosti proizvodstva elektricheskoy energii pri ispolzovanii silovogo potentsiala toplivnogo gaza." *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. No. 4 (40). 2013. 77–86. Print. 5. Sitnikov, V. V. "Novyye detander-generatornyye ustanovki GP

NKPG "Zorya"-"Mashproekt" kak odin iz putey ekonomii energeticheskikh resursov." *Naukovi pratsi: Tehnogenna bezpeka*. Vol. 61. No. 48. Nikolaev: ChDU im. P. Mogyilyi, 2006. 236–243. Print. 6. Agababov, V. S., A. V. Koryagin and A. Yu. Arharova. "Effektivnost ispolzovaniya dvuhstupenchatogo podogreva gaza pered DGA na TES." *Energoberezhnie i vodopodgotovka*. No. 4. 2004. 70–72. Print. 7. Epifanova, V. I. *Kompressornyye i rasshiritelnyye turbomashiny radialnogo tipa*. Moscow: MVTU im. N. I. Bauman, 1998. Print. 8. Yazik, A. V. *Sistemy i sredstva ohlazhdeniya prirodnoy gaza*. Moscow: Nedra, 1986. Print. 9. Bekirov, T. M. *Tehnologiya obrabotki gaza i kondensata*. Moscow: Nedra, 1999. Print. 10. Stepanets, A. A. "Ob effektivnosti detander-generatornykh agregatov v teplovoy sheme TETs." *Energetik*. No. 4. 1999. 2–4. Print. 11. Peng, D. Y., and D. B. Robinson. "A new two-constant equation of state." *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. No. 15. 1976. 59–64. Print. 12. Pedersen, K. S., and P. L. Christensen. *Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids*. New York: Taylor & Francis Group, 2007. Print. 13. Taleshian, M., H. Rastegar and H. Askarian Abyaneh. "Modeling and Power Quality Improvement of Grid Connected Induction Generators Driven by Turbo-Expanders." *International Journal of Energy Engineering* 2.4 (2012): 131–137. Print. 14. Babasola, A. *System Study and CO<sub>2</sub> Emissions Analysis of a Waste Energy Recovery System for Natural Gas Letdown Station Application*. Kingston: Queen's University Kingston, 2010. Print. 15. Lyihvar, N. V., Yu. N. Govoruschenko and V. A. Yakovlev. "Modelirovanie teploenergeticheskikh ustanovok s ispolzovaniem interaktivnoy shemnoy." *Probl. Mashinostroeniya*. No. 1. 2003. 30–41. Print. 16. Stefanov, E. V. *Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozduha*. St. Petersburg: AVOK North-West, 2005. Print. 17. Nimich, G. V., V. A. Mihaylov and E. S. Bondar. *Sovremennyye sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya vozduha*. Kiev: Bud. Avanpost-Prym, 2003. Print.

Поступила (received) 28.12.2015

**Шубенко Александр Леонидович** – член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом оптимизации процессов и конструкции турбомашин, Институт проблем машиностроения им. А. М. Подгорного НАН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 349-47-30, e-mail: shuben@ipmach.kharkov.ua.

**Aleksandr Shubenko** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department Head of optimization of processes and designs of turbomachinery, Institute of Problems of Mechanical Engineering A. N. Podgorny NAS Ukraine, Kharkov; tel.: (057) 349-47-30, e-mail: shuben@ipmach.kharkov.ua.

**Сарапин Владимир Павлович** – главный конструктор отдела оптимизации процессов и конструкции турбомашин, Институт проблем машиностроения им. А. М. Подгорного НАН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 349-47-42, e-mail: sarapin\_v@mail.ru.

**Sarapin Volodymyr** – Chief Designer of the optimization of processes and designs of turbomachinery department, Institute of Problems of Mechanical Engineering A. N. Podgorny NAS Ukraine, Kharkov; tel.: (057) 349-47-42, e-mail: sarapin\_v@mail.ru.

**Сенецкий Александр Владимирович** – кандидат технических наук, сотрудник отдела оптимизации процессов и конструкции турбомашин, Институт проблем машиностроения им. А. М. Подгорного НАН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 349-47-42, e-mail: aleksandr-seneckij@ukr.net. ORCID 0000-0001-8146-2562.

**Senetskiy Oleksandr** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Employee of the optimization of processes and designs of turbomachinery department, Institute of Problems of Mechanical Engineering A. N. Podgorny NAS Ukraine, Kharkov; tel.: (057) 349-47-42, e-mail: aleksandr-seneckij@ukr.net.

**Сарапина Марина Владимировна** – кандидат технических наук, Национальный университет гражданской защиты Украины, доцент кафедры охраны труда и техногенно-экологической безопасности, г. Харьков; тел.: (066) 712-30-07, e-mail: sarapina\_mv@mail.ru.

**Sarapina Maryna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National University of Civil Protection of Ukraine, Associate Professor at the Department of occupational, technogenic and environmental safety, Kharkov; tel.: (066) 712-30-07, e-mail: sarapina\_mv@mail.ru.