

УДК 621.515:536.662.004.82:620.92

**В.И. Самуся**, д-р техн. наук, проф.,  
**Ю.И. Оксень**, канд. техн. наук, доц., **М.В. Радюк**, асп.,  
Национальный горный университет, г. Днепропетровск

## **УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ШАХТНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

*Определены условия оптимальной работы теплосилового устройства, работающей на низкокипящих рабочих телах, при которых выработка электроэнергии максимальна. Показано, что показатели энергетической эффективности установки при использовании в качестве смесового рабочего тела бутан-пентана выше, чем при использовании каждого чистого компонента в отдельности и других рассмотренных рабочих тел.*

**Ключевые слова:** утилизация тепла, низкокипящее рабочее тело, генерация электроэнергии.

**Постановка проблемы.** В связи с истощением запасов органического топлива и продолжающимся загрязнением окружающей среды все большую актуальность приобретают проблемы рационального расходования топливно-энергетических ресурсов и внедрение энергосберегающих технологий. На горных предприятиях воздушные компрессорные станции являются одними из наиболее мощных потребителей электроэнергии, поэтому энергетическая эффективность этих предприятий во многом зависит от эффективного производства и расходования сжатого воздуха. Существенным резервом в повышении эффективности выработки сжатого воздуха является утилизация тепла, отводимого при его сжатии.

### ***Анализ исследований и публикаций.***

Известны технические решения по использованию этого тепла для нужд предприятий, в частности:

- для систем горячего водоснабжения [1,2];
- для нагрева в зимнее время воздуха, поступающего в шахту [3];
- для генерации пара хладагента в абсорбционных холодильных машинах [3, 4].

Недостаток этих технических решений состоит в том, что потребность в их применении носит сезонный характер, или же ограничивается наличием на шахтах установок кондиционирования воздуха с абсорбционными холодильными машинами. Перспективной пред-

ставляется круглогодичная утилизация этого тепла, состоящая в преобразовании его в электроэнергию в теплосиловых установках (ТСУ), работающих на низкокипящих рабочих телах (НРТ).

Из теории энергетических систем известно, что эффективность паровых ТСУ зависит не только от начальных и конечных параметров (давления и температуры пара), а также от свойств рабочих тел и особенностей их диаграмм состояния [5].

**Постановка задачи.** Целью настоящих исследований является оценка влияния температурного режима и свойств рабочих тел на эффективность ТСУ, утилизирующей тепло турбокомпрессорной установки.

**Изложение материала и результаты.**

Исследование проводилось для условий турбокомпрессоров К-250-61, широко применяющихся на горных предприятиях.

Схема турбокомпрессорной установки с утилизацией тепла сжатого воздуха для выработки электроэнергии, приведена на рис. 1.

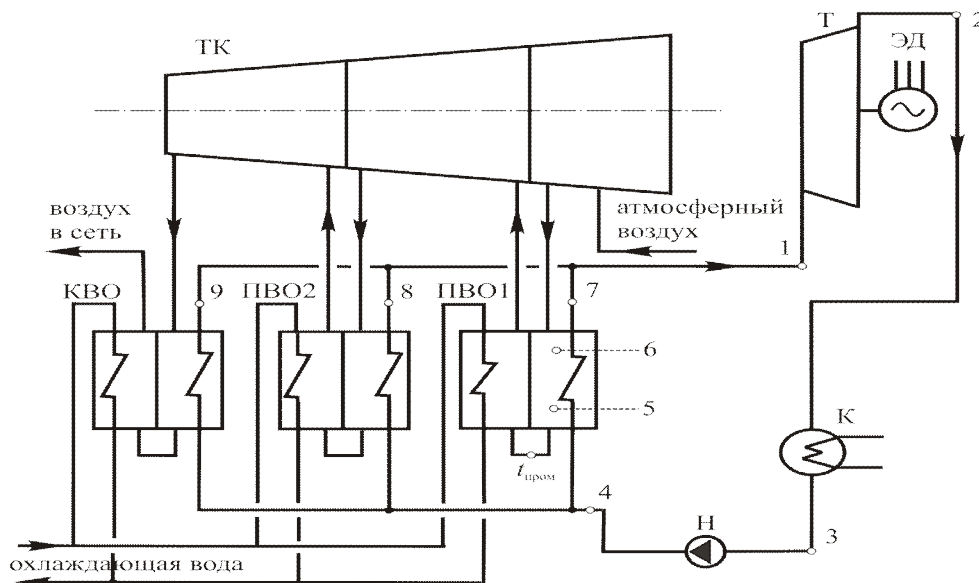


Рис. 1. Схема турбокомпрессорной установки с утилизацией тепла сжатого воздуха для выработки электроэнергии

Воздух, сжимаемый в турбокомпрессоре ТК, охлаждается в двух промежуточных воздухоохладителях ПВО1, ПВО2 и концевом КВО.

С целью повышения температурного потенциала утилизируемого тепла эти воздухоохладители, в отличие от типовых, предполагается выполнить двухсекционными. Первая по ходу движения воздуха секция включается в систему утилизации тепла, а вторая, служащая для окончательного охлаждения воздуха, включается в существующую

щую типовую систему охлаждения. Преобразование тепла в электроэнергию осуществляется с помощью ТСУ, работающей на НРТ. Такие установки получают в настоящее время все более широкое распространение при использовании низкопотенциального бросового тепла и тепла геотермальных источников [6, 7]. Основными элементами ТСУ являются турбина Т, конденсатор К, насос Н и парогенератор (испаритель), роль которого исполняют утилизационные секции воздухоохлаждателей (ВО).

Цикл изменения состояния НРТ в установке изображен на рис. 2. Номера характерных точек цикла соответствуют номерам точек, показанных на схеме установки (рис. 1).

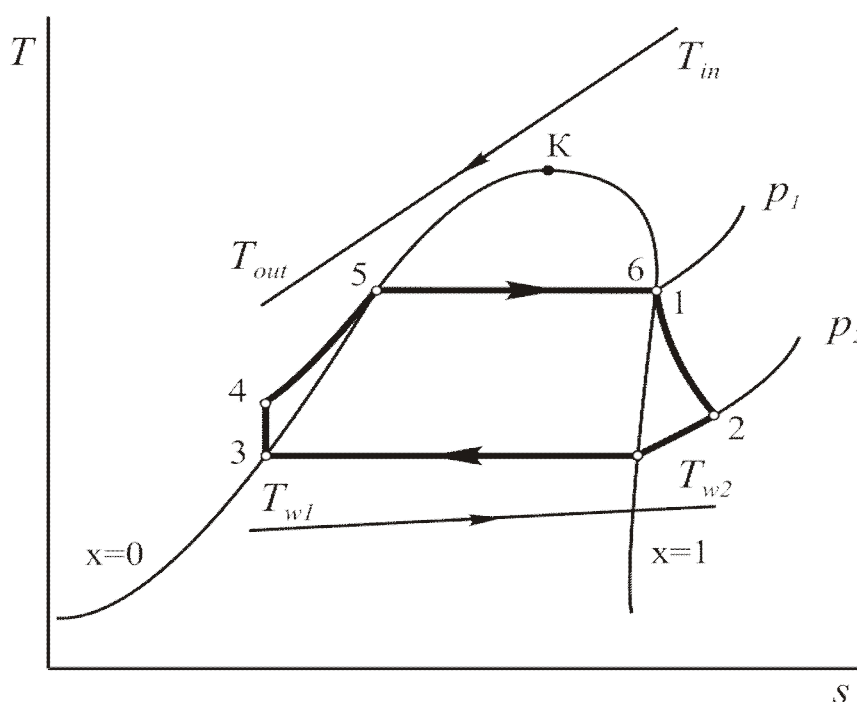


Рис. 2. Термодинамический цикл ТСУ

Показанная на рис. 2 верхняя пограничная кривая имеет положительный наклон верхней пограничной кривой т.е.  $(dT/ds)_{x=1} > 0$ . НРТ поступает в теплоутилизационные секции воздухоохлаждателей в жидкой фазе (точка 4). Здесь оно подогревается до состояния кипения (точка 5), испаряется до состояния сухого насыщенного пара (точка 6) и может перегреться. На рис. 2 показан частный случай парообразования НРТ, когда на выходе оно представляет собой сухой насыщенный пар (поэтому точки 1 и 6 совпадают). В турбине пар НРТ, расширяясь, производит работу, превращаемую в электрическую энергию с помощью электрогенератора. Конечное давление пара (в точке 2) определяется температурой его конденсации в конденсаторе.

Одним из основных параметров, определяющих работу теплоутилизационной установки, является температура воздуха, выходящего из теплоутилизационных секций воздухоохладителей (промежуточная температура охлаждения  $t_{\text{пром}}$ ), так как от этой величины зависит количество утилизируемого тепла и КПД цикла ТСУ. Важными параметрами являются также давление и температура пара НРТ перед турбиной.

Поэтому для обоснованного выбора параметров ТСУ необходимо исследовать влияние этих факторов на энергетические показатели установки: величину вырабатываемой электрической мощности  $N_{\text{эл}}$ , электрический КПД  $\eta_{\text{эл}}$  и КПД использования тепла, отводимого от сжатого воздуха  $\eta_Q$ . Эти величины рассчитывались по формулам:

$$N_{\text{эл}} = N_{\text{турб}} \eta_{\text{Тмех}} \eta_{\text{ЭГ}} - \frac{N_{\text{нас}}}{\eta_{\text{Нмех}} \eta_{\text{ЭД}}}; \quad (1)$$

$$\eta_{\text{эл}} = \frac{N_{\text{эл}}}{Q_{\text{ут}}}; \quad (2)$$

$$\eta_Q = \frac{N_{\text{эл}}}{Q_{\text{ут}} + Q_{\text{х}}}; \quad (3)$$

где  $N_{\text{турб}}$  и  $N_{\text{нас}}$  – внутренняя мощность турбины и насоса, кВт;  $\eta_{\text{мех.т}}$  и  $\eta_{\text{мех.н}}$  механические КПД турбины и насоса;  $\eta_{\text{ЭГ}}$  и  $\eta_{\text{ЭД.н}}$  – КПД электрогенератора и электродвигателя насоса;  $Q_{\text{ут}}$  – утилизируемая тепловая мощность, кВт;  $Q_{\text{х}}$  – тепловая мощность, отводимая в доохлаждающих секциях ВО, кВт.

Решение этих задач осуществляем на основе моделирования режимов работы теплоиспользующей установки. При моделировании учитываем ступенчатый характер изменения температуры НРТ при нагреве и парообразовании в воздухоохладителях и соответствующий график изменения температуры греющего воздуха. Начальную температуру охлаждаемого воздуха определяем на основе моделирования характеристик и режимов работы секций неохлаждаемых ступеней турбокомпрессора, осуществляемого в соответствии с [8]. Расчет свойств рабочих тел осуществляем с помощью программы REFPROP 7.0, разработанной National Institute of Standards and Technology (USA). Моделирование режимов работы ТСУ выполняем в среде программирования C++Builder 6.0 (Borland) при следующих

условиях: температура атмосферного воздуха на входе в первую секцию неохлаждаемых ступеней (СНС)  $15^{\circ}\text{C}$ ; его давление  $0,1$  МПа; конечное давление сжатого воздуха (абсолютное)  $0,9$  МПа; минимальные температурные напоры в испарителе и конденсаторе соответственно  $5^{\circ}\text{C}$  и  $10^{\circ}\text{C}$ ; внутренний и механический КПД турбины соответственно  $0,8$  и  $0,97$ ; внутренний и механический КПД насоса соответственно  $0,7$  и  $0,97$ ; КПД электрогенератора и электродвигателя насоса были приняты  $0,97$ . При этих условиях расчетные значения массового расхода воздуха  $5,2$  кг/с; температуры сжатого воздуха на выходе из каждой СНС соответственно  $117^{\circ}\text{C}$ ,  $130^{\circ}\text{C}$  и  $119^{\circ}\text{C}$ . Температура сжатого воздуха на выходе из утилизационных секций воздухоохладителей варьировалась в диапазоне от  $50$  до  $85^{\circ}\text{C}$ .

Известно, что все рабочие тела в зависимости от наклона нижней пограничной кривой T-s диаграммы состояния делятся на три группы: с положительным, отрицательным и близким к нулевому наклоном верхней пограничной кривой. Рабочие тела с положительным наклоном верхней пограничной кривой не требуют перегрева и исключают возможность конденсации паров рабочего тела на выходе из турбины, поэтому являются предпочтительными при выборе хладагента для утилизации низкопотенциального тепла с целью выработки электроэнергии [9]. На основании вышеизложенного были выбраны 8 озонобезопасных рабочих тел с положительным и близким к нулевому наклоном верхней пограничной кривой, принадлежащих к двум основным группам рабочих тел: галогеносодержащих R142b, R236ea, R245fa и углеводородов бутан, пентан, изобутан, неопентан. Рабочие тела выбирались таким образом, чтобы их критические температуры были выше максимальной температуры рассматриваемого источника тепла (сжатого воздуха на выходе из СНС –  $130^{\circ}\text{C}$ ). Исследовалось также смесевое рабочее тело бутан-пентан (80%/20%). Характерным свойством смесового рабочего тела является его переменная температура кипения, что способствует выравниванию температурных профилей нагреваемой и нагревающей сред, и, как следствие, уменьшение потерь работоспособности вследствие необратимости процессов теплообмена.

По результатам расчета на рис. 3–4 построены графики зависимостей основных энергетических показателей ТСУ от температуры воздуха на выходе из теплоутилизационных секций воздухоохладителей  $t_{\text{пром}}$ .

Таблиця №1

## Характеристики робочих тел

Показатели	R142b	R236ea	R245fa	бутан	пентан	неопентан	изобутан
Критическая температура (°C)	137,1	139,3	154,05	151,98	196,55	160,6	134,67
Критическое давление (МПа)	4,07	3,502	3,64	3,796	3,37	3,1964	3,64
GWP	2400	1350	1020	0	0	0	0
ODP	0,06	0	0	0	0	0	0

GWP (потенциал глобального потепления) = 100 лет, GWP для CO<sub>2</sub> = 1.

ODP (потенциал разрушения озонового слоя) для R11 = 1.

Влияние этой температуры на утилизируемую тепловую мощность и эффективность ее преобразования в электроэнергию показано на рис. 3 и рис. 4.

Из рис. 3 видно, что при работе ТСУ на смеси бутан-пентан вырабатывается максимальная электрическая мощность. Видно также, что зависимость  $N_{эл} = f(t_{пром})$  имеет максимум при определенной величине  $t_{пром}$ .

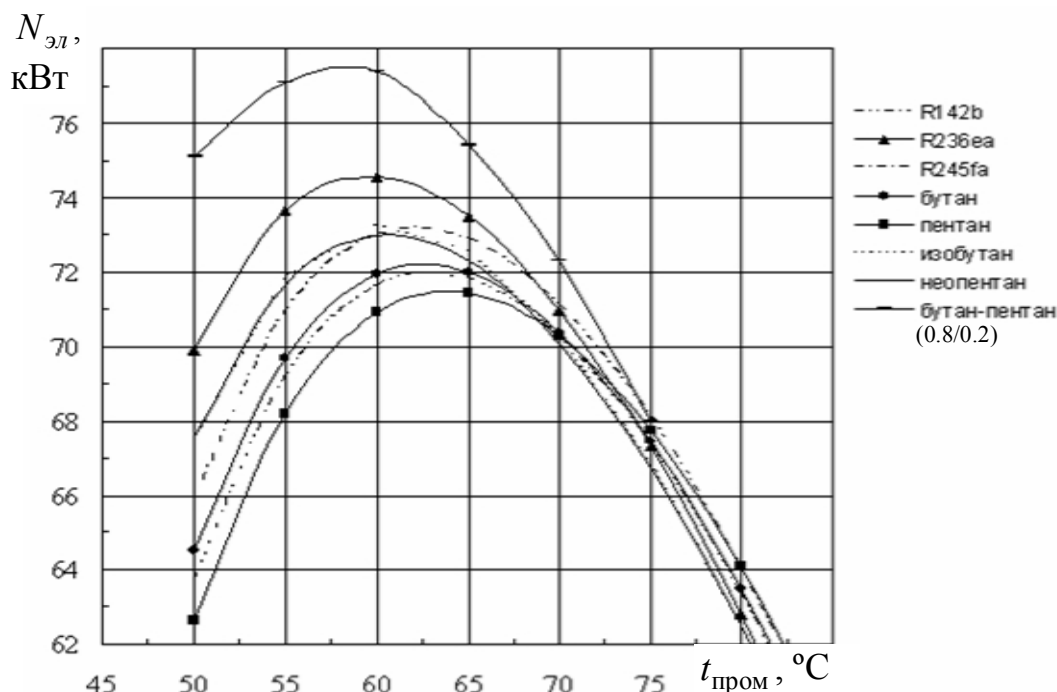


Рис. 3. Залежності виробленої електричної потужності від проміжної температури охолодження

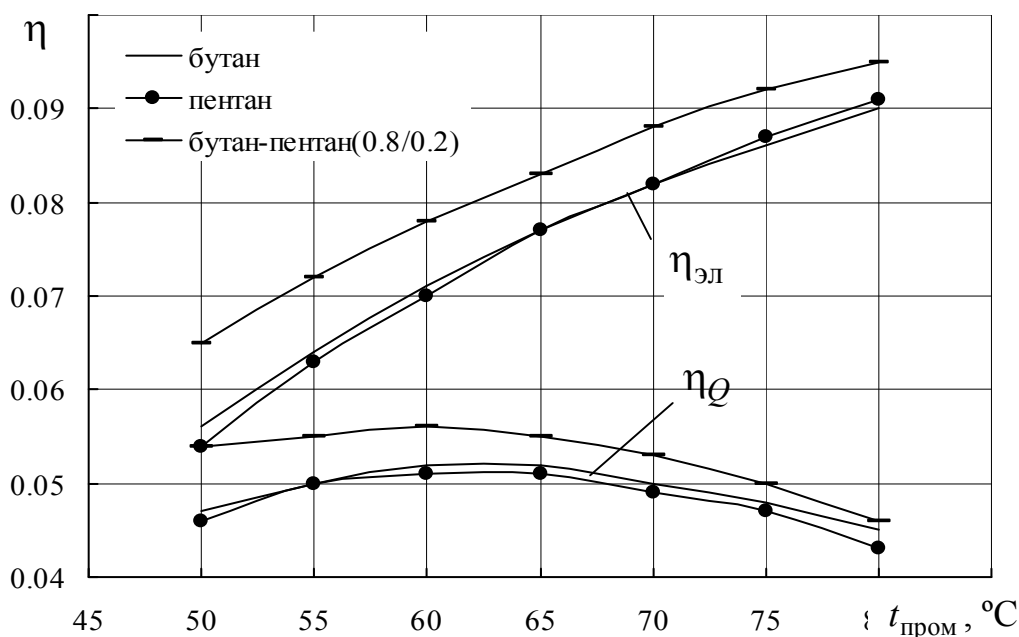


Рис. 4. Залежності електричного КПД і коефіцієнта використання тепла сжатого повітря від проміжної температури охолодження

Соответственно имеет максимум и коэффициент использования тепла, отведенного от сжатого воздуха  $\eta_Q$  (см. рис. 4). Наличие максимума объясняется противоположным влиянием  $t_{пром}$  на утилизируемую тепловую мощность и эффективность ее преобразования в электроэнергию. При увеличении  $t_{пром}$  утилизируемая тепловая мощность уменьшается, а эффективность преобразования теплоты в электроэнергию, оцениваемая КПД  $\eta_{эл}$ , увеличивается (см. рис. 4).

Из рис. 3 и 4 также следует, что показатели энергетической эффективности ТСУ при использовании смесового рабочего тела бутан-пентан выше, чем в случае каждого чистого компонента в отдельности и выше, чем в случае использования других рассмотренных рабочих тел.

**Выводы.** Установлено, что в условиях работы турбокомпрессора К-250-61 может быть получено 78 кВт электрической мощности, что составляет 5,2% от номинальной электрической мощности, потребляемой компрессором. Максимальное значение коэффициента преобразования утилизируемого тепла в электроэнергию составляет 0,078 при температуре воздуха на выходе из утилизационных секций воздухоохладителей 58 - 62°C.

Показатели энергетической эффективности ТСУ при использовании смесового рабочего тела бутан-пентан выше, чем в случае каж-

дого чистого компонента в отдельности и выше, чем в случае использования других рассмотренных рабочих тел.

Список литературы

1. Мялковский В.И. Утилизация тепла сжатого воздуха шахтных компрессоров / В.И. Мялковский, Л.В. Андрусенко // Вопросы эксплуатации шахтных стационарных установок: Сб. науч. тр. ВНИИГМ им. М.М. Федорова. – 1985. – С. 193 – 199.
2. Мялковский В.И. Современное состояние и перспективы применения тепловых насосов для теплоснабжения в угольной промышленности / В.И. Мялковский, Ю.П. Апалько // Вопросы эксплуатации шахтных стационарных установок: Сб. науч. тр. ВНИИГМ им. М.М. Федорова. – 1989. – С. 174 – 182.
3. Скрыпников В.Б. Энергосберегающая технология системы микроклимата промышленного объекта / В.Б. Скрыпников. – Днепропетровск: РИО ПГАСА, 2004. – 205 с.
4. Цейтлин Ю.А. Установки для кондиционирования воздуха шахт / Ю.А. Цейтлин. – М.: Недра, 1974. – 168 с.
5. Мартыновский В.С. Анализ действительных термодинамических циклов / В.С. Мартыновский. – М.: Энергия, 1972.
6. Сапожников М.Б. Предельная эффективность электрических станций на низкокипящих рабочих телах / М.Б. Сапожников, Н.И. Тимошенко // Теплоэнергетика. – 2005. – № 4. – С. 68-72.
7. Бинарные электрические станции / О.А. Поваров, В.А. Саакян, А.И. Никольский и др. // Тяжелое машиностроение. – 2003. – № 8. – С. 13-15.
8. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины / В.Ф. Рис. – Л.: Машиностроение, 1981. – 351 с.
9. Saleh V. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycle / V. Saleh, G. Koglbauer // Energy. – 2007. – Vol. 32, No.10. – P. 1201-1221.

Стаття надійшла до редколегії 25.10.2011.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Бойко Н.Г.

**В.І Самуся, Ю.І. Оксень, М.В. Радюк.** Утилізація низькопотенційного тепла шахтних компресорних установок для виробки електроенергії. Визначено умови оптимальної роботи теплосилової установки, що працює на низькокиплячих робочих тілах, при яких виробка електроенергії максимальна. Показано, що показники енергетичної ефективності установки при використанні сумішевого робочого тіла бутан-пентана вищі, ніж при використанні чистих компонентів, що складають суміш та інших розглянутих робочих тіл.

**Ключові слова:** утилізація тепла, низькокипляче робоче тіло, генерація електроенергії.

**V. Samusya, J. Oksen, M. Radiuk.** Waste Heat Recovery from Air Compressors for Power Generation in Mining. The optimum conditions for maximum power generation in waste heat recovery power plant have been determined. It has been shown that power plant's energy efficiency is higher in case of the use of the mixed working fluid butane-pentane rather than single working fluids that the mixture consists of.

**Keywords:** waste heat recovery, organic working fluid, power generation.

© Самуся В.И., Оксень Ю.И., Радюк М.В., 2012