



## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНОЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИНТОВЫХ РАСШИРИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Р.Р. Ротач, Ю.В. Ваньков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

rita-nurkaeva@mail.ru

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Повышение эффективности работы котельной. Разработка схемы внедрения винтовых расширительных машин (ВРМ) в тепловую схему котельной. Расчет основных технических характеристик ВРМ и сетевых подогревателей. Расчет экономического эффекта и оценка целесообразности применения энергосберегающих технологий на промышленном предприятии. *МЕТОДЫ.* В работе использованы методы вычислительной математики, теории теплообмена, методы технико-экономических расчетов в энергетике, термодинамического анализа энергоустановок. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье приведен вариант повышения эффективности работы котельного цеха в г. Нефтекамск путем включения в работу паровых котлов ДКВР, стоящих на консервации, и внедрения винтовых расширительных машин. Предлагается в неотапливаемый период (апрель – сентябрь) включать паровые котлы для выработки пара. Пар будет проходить через ВРМ, понижая свое давление до необходимого для сетевых подогревателей для последующего подогрева воды на горячее водоснабжение. При этом на генераторах ВРМ будет вырабатываться электроэнергия, которая будет передаваться на шины собственных нужд котельной. По результатам расчетов, к установке было выбрано две ВРМ мощностью 700 кВт каждая, а также три сетевых подогревателя. При рассматриваемом включении дополнительных паровых котлов и ВРМ в неотапливаемый период года, выработанная электроэнергия полностью покрывает затраты на собственные нужды котельной. Срок окупаемости проекта составит 5 лет. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Результаты технико-экономических расчетов показывают целесообразность внедрения ВРМ в тепловую схему котельной как энергосберегающее мероприятие.

**Ключевые слова:** винтовая расширительная машина; котельная; паровой котел; выработка электроэнергии; собственные нужды котельной; энергосбережение; когенерация.

**Для цитирования:** Ротач Р.Р., Ваньков Ю.В. Повышение эффективности котельной при использовании винтовых расширительных машин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 14-23. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-14-23.

## INCREASING THE EFFICIENCY OF THE BOILER HOUSE USING SCREW EXPANSION MACHINES

RR. Rotach, YuV. Vankov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

rita-nurkaeva@mail.ru

**Abstract:** *THE PURPOSE.* Improving the efficiency of the boiler house. Development of a scheme for the introduction of screw expansion machines (SEM) into the thermal scheme of a boiler house. Calculation of the main technical characteristics of SEM and network heaters. Calculation of the economic effect and assessment of the feasibility of using energy-saving technologies in an industrial enterprise. *METHODS.* The work uses methods of computational mathematics, the theory of heat and mass transfer, methods of technical and economic calculations in the energy sector, and thermodynamic analysis of power plants. *RESULTS.* The article presents a variant of improving the efficiency of the boiler shop in Neftekamsk by putting into operation the steam boilers DDVWT, which are mothballed, and introducing screw expansion machines. It is proposed in the non-heating period (April - September) to turn on steam boilers to generate steam. The steam will pass through the SEM, lowering its pressure to that required for network heaters for subsequent heating of water for hot water supply. At the same time, electricity will be generated on the SEM generators, which will be transmitted to the auxiliary tires of the boiler house. According

to the results of calculations, two SEM with a capacity of 700 kW each, as well as three network heaters, were selected for the installation. With the considered inclusion of additional steam boilers and SEM in the non-heating period of the year, the generated electricity will fully cover the costs for the auxiliary needs of the boiler house. The payback period of the project will be 5 years. **CONCLUSION.** The results of technical and economic calculations show the feasibility of introducing SEM into the thermal scheme of the boiler house as an energy-saving measure.

**Keywords:** screw expansion machine; boiler room; steam boiler; power generation; own needs of the boiler room; energy saving; cogeneration.

**For citation:** Rotach RR, Vankov YuV. Increasing the efficiency of the boiler house using screw expansion machines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(2):14-23. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-14-23.

### Введение

Необходимым условием повышения энергоэффективности экономики России является максимально возможное использование тепловых нагрузок для организации комбинированной выработки электрической и тепловой энергии (когенерации), позволяющей максимально эффективно реализовать потенциал топлива с получением не только теплоты, но и электроэнергии. При этом коэффициент использования теплоты (КИТ) может достигать 85-90% [1-3].

В последние годы особенность развития когенерации заключается в активном сооружении крупными предприятиями собственных электрогенерирующих источников малой и средней мощности. Это позволяет им в короткие сроки решить локальные проблемы дефицита электроэнергии, повысить надежность электроснабжения, уменьшить производственные издержки.

В малой энергетике уровень внедрения малых когенерационных установок остается пока весьма низким. Это объясняется в основном экономическими факторами – необходимостью привлечения заемных инвестиций, их высокой стоимостью. Однако продолжающийся рост цен на топливо и совершенствование оборудования когенерационных установок в скором времени могут изменить ситуацию. Если раньше в нашей стране потребности в тепловой и электрической энергии (в джоулях) соотносились как 2:1, то сегодня это соотношение 1:1, и в будущем будет стремиться к 1:2. Это означает, что выработанная когенерационными установками электроэнергия будет крайне востребована [4-7].

Зарубежный опыт показывает, что именно благодаря когенерации и энергоэффективности системы централизованного теплоснабжения оказываются очень экологичны и рентабельны. Без когенерации система ЦТ оказывается не конкурентоспособной и проигрывает локальным системам теплоснабжения [8-11].

Важной предпосылкой для крупномасштабного развития когенерации в нашей стране является наличие большого количества котельных, суммарной мощностью около 450 тыс. Гкал/ч, из которых примерно 75% - газовые котельные, в первую очередь пригодные для преобразования в мини-ТЭЦ [12].

Развитие когенерации будет способствовать снижению потребностей во вводах новых генерирующих мощностей, сокращению объемов нового электросетевого строительства, уменьшению потерь в электрических сетях. Когенерационные установки имеют преимущества в части сроков сооружения и заблаговременности инвестиций по сравнению с крупными ТЭС [13,14] (табл. 1).

Таблица 1

Энергетический потенциал котельных России [1]

| Показатель                                                                                      | Мощность котельной, Гкал/ч |      |        | Всего |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------|--------|-------|
|                                                                                                 | <3                         | 3-20 | 20-100 |       |
| Суммарная мощность котельных, на базе которых эффективны установки с когенерацией, тыс.Гкал/час | 10                         | 27   | 35     | 72    |
| Потенциал электрической мощности, ГВт                                                           | 4                          | 23   | 14     | 41    |
| Потенциал выработки электроэнергии за счет когенерации, млрд.кВт·ч/год                          | 22                         | 94   | 59     | 175   |
| Емкость рынка (программа на 10 лет), млрд.руб/год                                               | 24                         | 81   | 77     | 182   |

В большинстве паровых котельных установлены котлы различных типов, вырабатывающие пар с давлением 1,3 МПа. В то же время потребители используют его, как правило, при давлении 0,3-0,4 МПа. Снижение давления пара осуществляется в дроссельных устройствах, при этом потенциальная энергия его теряется безвозвратно.

Неоправданных потерь поможет избежать полезное использование этого перепада давления посредством установки паровых двигателей или противодавленческих турбин малой мощности, вырабатывающих электроэнергию на базе теплового потребления и выполняющих функцию редуктора при снижении давления пара до требуемого потребителями. Использование в данных котельных малогабаритных паровых двигателей с генератором электроэнергии, работающих за счет избыточного давления пара, будет способствовать обеспечению полного или частичного автономного электроснабжения предприятия, повышению надежности его энергообеспечения, значительному снижению расходов на потребляемую из системы электроэнергию [15-16].

Одним из путей решения вопроса реконструкции относительно небольших паровых котельных в мини-ТЭЦ можно считать использование винтового двигателя, который работает на теремом в дроссельных устройствах перепада давления.

### ***Материалы и методы***

#### ***Описание объектов и методов исследования.***

Объектом исследования является котельный цех №2 с водогрейными и паровыми котлами в г. Нефтекамск.

В статье рассматривается модернизация КЦ-2 БашПТС-Нефтекамск путем ее надстройки винтовыми расширительными машинами для выработки электроэнергии для покрытия собственных нужд.

Котельный цех-2 (КЦ-2), расположенный в г. Нефтекамск, респ. Башкортостан, является теплоснабжающим предприятием, обеспечивающим население теплом и горячей водой. Рабочее топливо котельной-природный газ, резервное-мазут.

На сегодняшний день в КЦ-2 установлено 5 водогрейных котлов, из них 3 котла марки ПТВМ-100, 2 котла ПТВМ-50. Также в котельной установлено 6 паровых котлов: 3 котла марки ДКВР-10-13, 2 котла ДКВР-20-13. Два котла ДКВР-10 (ст. №5 и ст. №6) находятся в работе для подогрева мазута в мазутном хозяйстве, котлы работают попеременно. Остальные 4 котла находятся на длительной консервации и в работе котельной не участвуют. Все котлы работают на общий коллектор пара.

Рассматривается вариант модернизации, состоящий в выведении из консервации одного котла ДКВР-20 и одного котла ДКВР-10 в неотапливаемый период года (с апреля по сентябрь). Пар после котла предлагается направлять в винтовую расширительную машину (ВРМ) для дальнейшего снижения давления пара и выработки электроэнергии на собственные нужды котельной. Отработанный в турбине пар поступает в установленные сетевые подогреватели для нагрева сетевой воды потребителям для нужд ГВС.

Этот эффект не ограничивается только энергосбережением, но и позволяет значительно повысить надежность электроснабжения котельной, а также полностью или частично отказаться от покупки электроэнергии извне на покрытие собственных нужд, получая при этом значительную экономию.

Электроэнергию с генераторов винтовых машин предлагается направлять покрытие собственных нужд котельного цеха.

К расходу электроэнергии на собственные нужды котельной относятся затраты на: электродвигатели тягодутьевых установок котлов; электродвигатели сетевых, рециркуляционных, питательных, подпиточных, насосов химводоочистки, мазутного хозяйства; приводы электрифицированных задвижек; электродвигатели систем отопления и вентиляции производственных помещений; электродвигатели ремонтных мастерских; освещение производственных помещений. Расходы электроэнергии на рециркуляцию воды в котел, на перекачку сырой, подпиточной, питательной воды, на рециркуляцию мазута определялись по соответствующим характеристикам насосов при их средней эксплуатационной производительности и составили 437 кВт и 353 кВт соответственно для отопительного и летнего периодов. Расход электроэнергии на тягодутьевые установки определялся при испытаниях котлов. Расход электроэнергии на прочие нужды (электропривод задвижек, освещение, вентиляцию и отопление производственных помещений и т.д.) определялись по установленной мощности соответствующих механизмов производственных нужд с учетом их загрузки и составили 196 кВт и 134 кВт соответственно для отопительного и летнего периодов.

#### ***Краткое описание паровых котлов котельной***

ДКВР-10/13, ДКВР-20/13 - газомазутные котлы, предназначенные для выработки

насыщенного пара при сжигании жидкого и газообразного топлива. Котлы являются вертикально-водотрубными, двухбарабанными, экранированными, с естественной циркуляцией. Оборудованы питательным экономайзером некипящего типа. На котлах установлены газомазутные горелки ГМГ-5,6. Подача воздуха осуществляется вентилятором ВД10/20, а тяга обеспечивается дымососом Д-13,5. Котел предназначен для выработки насыщенного пара при сжигании жидкого и газообразного топлива. Проектная производительность 10/20 т/час. Давление пара 13 кгс/см<sup>2</sup>.

Характеристики паровых котлов ДКВР, установленных в КЦ-2, приведены в таблице 2.

Таблица 2

## Характеристики паровых котлов

| Наименование                         | ДКВР-20-13 | ДКВР-10-13 |
|--------------------------------------|------------|------------|
| Производительность, т/ч              | 20         | 10         |
| Давление на выходе из котла, МПа     | 1,3        | 1,3        |
| Температура на выходе из котла, °С   | 195        | 195        |
| Энтальпия на выходе из котла, кДж/кг | 2809,65    | 2809,65    |

По методике, изложенной [2], были выполнены расчеты по определению мощности машины. По итогу расчетов (табл.3), было выбрано к установке 2 ВРМ мощностью 700 кВт.

Таблица 3

## Характеристики винтовых расширительных машин

| Наименование                     | Значение |
|----------------------------------|----------|
| Производительность, кг/с         | 8,3      |
| Давление на входе, МПа           | 1,3      |
| Температура на входе, °C         | 195      |
| Давление на выходе, МПа          | 0,3      |
| Температура на выходе, °C        | 133      |
| Теоретический расход пара, кг/с  | 8,3      |
| Диаметр роторов, м               | 0,4      |
| Длина роторов, м                 | 0,516    |
| Мощность на валу генератора, кВт | 700      |

На рисунке 1 представлена схема внедрения ВРМ в котельный цех.

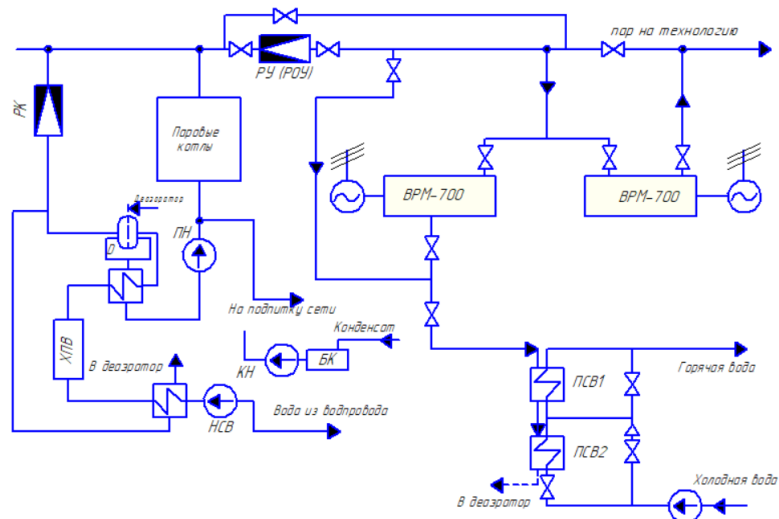


Рис.1. Схема внедрения ВРМ в котельный цех  
РК – редуцирующий клапан, РУ- редуцирующее устройство, ХПВ – химическая подготовка воды, КН – конденсатный насос, БК – бак конденсата, НСВ – насос сетевой воды, ПСВ – подогреватель сетевой воды

*Fig.1. SEM implementation scheme in the boiler room*

*PRV – pressure reducing valve, RD- reducing device, CWT – chemical water treatment, CP – condensate pump, CT – condensate tank, NWP – network water pump, HWH – heating water heater, FP – feed pump*

Таблица 4

Исходные данные для расчета подогревателя сетевой воды

| Наименование                                                 | Значение |
|--------------------------------------------------------------|----------|
| Давление греющего пара, $p_n$ , МПа                          | 0,3      |
| Температура пара, $t_n$ , °C                                 | 133      |
| Температура насыщения, $t_n$ , °C                            | 95       |
| Энтальпия греющего пара, $i_n$ , кДж/кг                      | 2724,9   |
| Температура воды на входе в подогреватель, $t_{в.вх}$ , °C   | 50       |
| Энтальпия воды на входе в подогреватель, $i_{в.вх}$ , кДж/кг | 209,93   |
| Температура конденсата, $t_k$ , °C                           | 93       |
| Энтальпия конденсата, $i_k$ , кДж/кг                         | 389,6    |
| Энтальпия насыщения, $i_n$ , кДж/кг                          | 398,18   |
| Расход пара, $D_n$ , кг/с                                    | 6,94     |

На рисунке 2 представлена схема входящих и выходящих потоков в сетевой подогреватель.

Тепловой расчет подогревателя сетевой воды

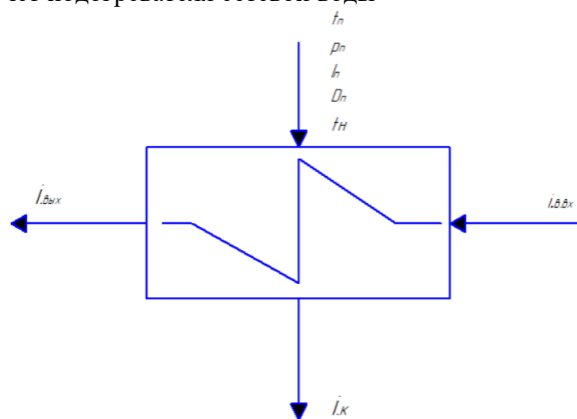


Рис. 2. Схема входящих и выходящих потоков в сетевой подогреватель

Fig.2. Scheme of incoming and outgoing flows to the network heater

Пар поступает в подогреватель из ВРМ. Тепловой баланс по паровой стороне позволяет определить расход воды:

$$D_n (i_n - i_k) = \frac{1}{\eta} D_{\text{в}} (i_{\text{в.вых}} - i_{\text{в.вх}}) \quad (1)$$

$$D_{\text{в}} = \frac{D_n (i_n - i_k) \eta}{i_{\text{в.вых}} - i_{\text{в.вх}}} = \frac{6,94 \cdot (2724,9 - 389,6) \cdot 0,995}{377,38 - 209,93} = 96,3 \text{ кг/с} \quad (2)$$

По режиму потребителю в летний период отпускается 800 т/ч (222 кг/с) горячей воды. Исходя из расчетов, необходимо поставить три подогревателя сетевой воды.

Тепловая нагрузка подогревателя определяется по водяной стороне:

$$Q = D_{\text{в}} \cdot (i_{\text{в.вых}} - i_{\text{в.вх}}) = 96,3 \cdot (377,38 - 209,93) = 16125 \text{ кВт} \quad (3)$$

Среднегеометрическая разность температур в подогревателе:

$$\Delta t_{\text{ср.лог}} = \frac{t_{\text{в.вых}} - t_{\text{в.вх}}}{\ln \frac{t_{\text{в.вых}} - t_{\text{в.вх}}}{\theta}} \quad (4)$$

Примем величину недогрева  $\theta =$

$$\Delta t_{\text{ср.лог}} = \frac{90 - 50}{\ln \frac{90 - 50}{\theta}} = 13,35^\circ \text{C} \quad (5)$$

Средняя температура воды:

$$t_f = t_n - \Delta t_{\text{ср.лог}} = 95 - 13,35 = 81,65^\circ\text{C} \quad (6)$$

Трубы латунные, следовательно,  $\delta = 0,0012$  м,  $d_6 = 0,016$  м.

По таблицам воды и водяного пара определяем физические свойства воды при  $t_f = 81,65$ :

$$\lambda_f = 0,688 \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \cdot K, \rho_f = 970,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \nu_f = 3,57 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \text{Pr}_f = 2,18$$

Скорость жидкости для стационарных теплообменников обычно принимается 1,5...2,5 м/с. Принимаем  $\omega_6 = 1,5$  м/с.

Коэффициент  $B_1$ , зависящий от комплекса  $B$ , учитывающий свойства пленки конденсата при теплоте конденсации  $r'$ , определим при средней температуре стенки. Определим величину  $B$  при  $t_n = 95^\circ\text{C}$ .

По таблицам воды и водяного пара определяем физические свойства воды при  $t_n = 95^\circ\text{C}$ :

$$\mu_{\text{ж}} = 0,0003 \text{ Н} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2}, \lambda_{\text{ж}} = 0,6755 \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \cdot K, \rho_{\text{ж}} = 962 \text{ кг} / \text{м}^3$$

$$B = \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{ж}}^3 \cdot \rho_{\text{ж}}^2 \cdot g}{\mu_{\text{ж}}}} = \sqrt[4]{\frac{0,6755^3 \cdot 962^2 \cdot 9,81}{0,0003}} = 310,8 \quad (7)$$

Определим величину  $B_1$  при определяющем геометрическом размере  $h=0,498$  и удельной теплотой парообразования  $r'=2335,3$  кДж/кг.

$$B_1 = cB(r')^{0,25} h^{-0,25} = 1,15 \cdot 310,8 \cdot (2335,3 \cdot 10^3)^{0,25} \cdot 0,468^{-0,25} = 1681 \quad (8)$$

$$\Delta t_{\text{ср.лог}} - \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} q = 13,35 - \frac{0,001}{107} q \quad (9)$$

где  $\lambda_{\text{ст}}$  – коэффициент теплопроводности стенки, для латуни примем 107 Вт/(м·К).

По результатам преобразования выражения (9), значение величины  $q=60000$  Вт/м·К.

Далее находим поправочный коэффициент:

$$k = \frac{q}{\Delta t_{\text{ср.лог}}} = \frac{60000}{13,35} = 4494 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (10)$$

Поверхность нагрева сетевого подогревателя равна

$$F = \frac{Q_{n4}}{\Delta t_{\text{ср.лог}}} = \frac{16125 \cdot 10^3}{4494 \cdot 13,35} = 268,8 \text{ м}^2 \quad (11)$$

С запасом на заглушаемые при эксплуатации трубки принимаем расчетную поверхность нагрева  $F_p = 270$  м<sup>2</sup>.

Результаты теплового расчета сетевого подогревателя представлены в Таблице 5

Таблица 5

Результаты расчета подогревателя сетевой воды

| Наименование                                                    | Значение |
|-----------------------------------------------------------------|----------|
| Расход воды, $D_{\text{в}}$ , кг/с                              | 96,3     |
| Тепловая нагрузка подогревателя, $Q$ , кВт                      | 16 125   |
| КПД подогревателя, %                                            | 0,995    |
| Мощность удельного потока, $q$ , Вт/м·К                         | 60 000   |
| Площадь поверхности нагрева подогревателя, $F$ , м <sup>2</sup> | 270      |

#### Технико-экономический расчет

Средний расход электроэнергии КЦ на собственные нужды с апреля по сентябрь составляет 6000 тыс.кВт·ч.

При работе ВРМ 6 месяцев в год (апрель-сентябрь), будет выработано 6 048 тыс.кВт·ч электроэнергии.

Таким образом, ВРМ полностью покроют затраты на собственные нужды котельной в неотапливаемый период.

#### **Результаты расчетов и их обсуждение**

В таблицах 6,7 представлены основные показатели экономической эффективности при внедрении ВРМ в котельный цех за последующие 10 лет.

При анализе таблиц, можно увидеть устойчивую тенденцию к росту всех затрат проекта вследствие ежегодного увеличения коэффициентов индексации. Однако итоговая экономия денежных средств остается достаточно высокой.

Таблица 6

Оценочный расчет экономической эффективности внедрения ВРМ за период 2023-2027 гг.

| Год                                                    | 2023      | 2024      | 2025      | 2026      | 2027      |
|--------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Экономия э/э на СН, тыс.кВт·ч/год                      | 6048      | 6048      | 6048      | 6048      | 6048      |
| Цена кВт·ч с учётом индексации, руб./тыс.кВт·ч         | 4,340     | 4,488     | 4,645     | 4,807     | 4,975     |
| Экономия на СН, тыс. тыс.руб/год                       | 26 248,32 | 27 140,76 | 28 090,69 | 29 073,86 | 30 091,45 |
| Затраты на ремонт (среднегодовые) тыс.руб.             | 400,00    | 415,20    | 429,32    | 444,34    | 459,89    |
| Потребление газа котлом ДКВР-20, тыс.м <sup>3</sup>    | 3 196,80  | 3 196,80  | 3 196,80  | 3 196,800 | 3 196,800 |
| Цена газа с учетом индексации, руб./тыс.м <sup>3</sup> | 5 012,38  | 5 182,80  | 5 364,20  | 5 551,95  | 5 746,26  |
| Затраты на сжигание газа, тыс.руб.                     | 16 023,58 | 16 568,38 | 17 148,27 | 17 748,46 | 18 369,66 |
| Итоговая экономия, тыс. руб./год                       | 9 824,74  | 10 157,18 | 10 513,10 | 10 881,06 | 11 261,90 |

Таблица 7

Оценочный расчет экономической эффективности внедрения ВРМ за период 2028-2032 гг.

| Год                                                    | 2028      | 2029      | 2030      | 2031      | 2032      |
|--------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Экономия э/э на СН, тыс.кВт·ч/год                      | 6048      | 6048      | 6048      | 6048      | 6048      |
| Цена кВт·ч с учётом индексации, руб./тыс.кВт·ч         | 5,150     | 5,330     | 5,516     | 5,709     | 5,909     |
| Экономия на СН, тыс. тыс.руб/год                       | 31 144,65 | 32 234,71 | 33 362,93 | 34 530,63 | 35 739,20 |
| Затраты на ремонт (среднегодовые) тыс.руб.             | 475,99    | 492,65    | 509,89    | 527,74    | 546,21    |
| Потребление газа котлом ДКВР-20, тыс.м <sup>3</sup>    | 3 196,80  | 3 196,80  | 3 196,80  | 3 196,80  | 3 196,80  |
| Цена газа с учетом индексации, руб./тыс.м <sup>3</sup> | 5 947,39  | 6 155,54  | 6 370,99  | 6 593,97  | 6 824,76  |
| Затраты на сжигание газа, тыс.руб.                     | 19 012,59 | 19 678,04 | 20 366,76 | 21 079,60 | 21 817,39 |
| Итоговая экономия, тыс. руб./год                       | 11 656,06 | 12 064,03 | 12 486,27 | 12 923,29 | 13 375,60 |

В таблице 8 представлены основные экономические показатели проекта.

Проект внедрения ВРМ в котельную имеет хорошие экономические показатели. Об этом свидетельствует внутренняя норма доходности, процент которой больше ставки дисконтирования, равный 10%. Индекс прибыльности проекта больше 1, что тоже является хорошим показателем. Период окупаемости составляет 5 лет. Для энергетической отрасли данное значение является оптимальным.

Таблица 8

#### **Экономические показатели проекта по внедрению ВРМ**

| № | Показатель                                    | Значение  |
|---|-----------------------------------------------|-----------|
| 1 | Чистый дисконтированный доход (NPV), тыс.руб. | 18 881,60 |
| 2 | Внутренняя норма доходности (IRR), %          | 17,70     |
| 3 | Индекс прибыльности (PI)                      | 1,37      |
| 4 | Период окупаемости (PBP), лет                 | 5         |

### Выводы

В статье рассмотрен вариант повышения эффективности котельной в г. Нефтекамск путем внедрения ВРМ в тепловую схему котельной. Предлагается в неотапливаемый период (апрель – сентябрь) включать паровые котлы, находящиеся на консервации, для выработки пара. Пар будет проходить через ВРМ, понижая свое давление до необходимого для сетевых подогревателей для последующего подогрева воды на горячее водоснабжение. При этом на генераторах ВРМ будет вырабатываться электроэнергия, которая будет передаваться на шины собственных нужд котельной.

По результатам расчетов было выбрано к установке 2 ВРМ мощностью 700 кВт каждая, а также 3 сетевых подогревателя, с площадью поверхности 270 м<sup>2</sup>.

Включение двух дополнительных паровых котлов ДКВР с установкой трех сетевых подогревателей в неотапливаемый период, а также надстройка котельной двумя винтовыми расширительными машинами, даст возможность полностью покрывать собственные нужды котельной в электроэнергии на данный период.

Положительная экономическая эффективность проекта обусловлена следующими расчетными показателями: ЧДД = 18881,60 тыс.руб., ВНД = 17,7%, индекс прибыльности = 1,37, период окупаемости – 5 лет. Итоговая экономия в 2023 г. составит 9824,74 тыс. руб. и будет расти из года в год, учитывая изменение коэффициента индексации

### Литература

1. Клименко А.В., Агабабов В.С., Рогова А.А., Тидеман П.А. Схемы ПГУ-КЭС и ПГУ-ТЭЦ с системами одновременного совмещенного производства тепла и холода // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 1 (87). С. 20–23.
2. Ротач Р.Р., Ваньков Ю.В., Зиганшин Ш.Г., Измайлова Е.В. Оптимизация тепловой схемы путем внедрения паровой винтовой машины // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. №21(5). С. 14-21.
3. Березин С. Р., Носков А. Н., Щеглов Г. А. Определение показателей рабочего процесса паровой винтовой машины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 1. С. 50-56.
4. Калинин Н.В., Жигулина Е.В., Мартынов А.В. Эффективность расширительных машин в составе установок и систем // Надежность и безопасность энергетики. 2017. №4 (35). С.46-49.
5. Куличихин В.В., Тюняев М.В. Детандер-генераторные агрегаты в энергетике России. Мифы и реальность // Надежность и безопасность энергетики. 2017; (4):62-69.
6. Клименко А.В., Агабабов В.С., Борисова П.Н. Совместная генерация произведенных энергоносителей (обзор) // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 6–29.
7. Агабабов В.С., Петин С.Н., Борисова П.Н. Термодинамический анализ схемы бестопливной установки для одновременной генерации электроэнергии и холода // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 4 (102). С. 39–45.
8. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Экспериментальные исследования оптимального управления расходом энергии // АВОК. 2017. № 1. С. 51-55.
9. Wei He, Jihong Wang. Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: A review: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. V.87. pp.77-95.
10. Rotach R., Vankov Y., Ziganshin S., 2019b. Efficiency of Introducing a Steam Screw-Rotor Machine to the Heating Power Plant Circuit. E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE), Volume 140, pp. 1–4
11. Vankov JV, Rotach RR, Laptev SV, Ziganshin SG, Afanaseva OV. Introduction of a Steam Screw-Rotor Machine to Improve the Energy and Economic Efficiency of Chemical Enterprises: International Journal of Technology (IJTech). 2020. V. 11. No 8.
12. Antonio Giuffrida. Improving the semi-empirical modelling of a single-screw expander for small organic Rankine cycles: Applied Energy. 2017. V. 193.
13. Giuseppe Bianchi, Stuart Kennedy, Obadah Zaher, Savvas A. Tassou, Jeremy Miller, Hussam Jouhara. Numerical modeling of a two-phase twin-screw expander for Trilateral Flash Cycle applications: International Journal of Refrigeration. 2018. V. 88.
14. Dumont O., Parthoens A. Experimental investigation and optimal performance assessment of four volumetric expanders (scroll, screw, piston and roots) tested in a small-scale organic Rankine cycle system: Energy. 2018. V.165. pt A. pp.1119-1127.



15. G.Li, B.Lei, Yu.Wu. Influence of inlet pressure and rotational speed on the performance of high pressure single screw expander prototype: *Energy*. 2018. V.147. pp. 279-285.
16. Diao A., Wang Yu., Guo Yu. Development and application of screw expander in natural gas pressure energy recovery at city gas station: *Applied Thermal Engineering*. 2018. V.14. pp. 665-673.

### Авторы публикации

**Ротач Рита Рустемовна** – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

**Ваньков Юрий Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ), Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Klimenko AV, Agababov VS, Rogova AA, Tideman PA. Schemes of CCGT-CPP and CCGT-CHP with systems of simultaneous combined production of heat and cold. *Energy saving and water treatment*. 2017;1(87):20-23.
2. Rotach RR, Vankov YuV, Ziganshin ShG, Izmaylova EV. Optimization of the thermal circuit by introduction of the steam screw-rotor machine. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):14-21. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-14-21.
3. Berezin SR, Noskov AN, Shcheglov GA. Determination of the parameters of the working process of a steam screw engine. *News of higher educational institutions. Engineering*. 2016;1:50-56.
4. Kalinin NV, ZHigulina EV, Martynov AV. Efficiency of expansion machines in plants and systems. *Reliability and security of energy*. 2017;4(35):46-49.
5. Kulichikhin VV, Tyunyaev MV. Expander-generator units in the energy sector of Russia. Myths and reality. *Reliability and safety of energy*. 2017;4:62-69.
6. Klimenko AV, Agababov VS, Borisova PN. Co-generation of produced energy carriers (overview). *Scientific and technical statements of SPbPU. Natural and engineering sciences*. 2019;26-29. doi: 10.18721/JEST.25201.
7. Agababov VS, Petin SN, Borisova PN Thermodynamic analysis of the scheme of a fuel-free installation for the simultaneous generation of electricity and cold. *Energy saving and water treatment*. 2017;4 (102):39-45.
8. Tabunshchikov YuA, Brodach MM. Experimental studies of optimal energy consumption control. *ABOK*. 2017;1:51-55.
9. Wei He, Jihong Wang. Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;87:77-95.
10. Rotach R, Vankov Y, Ziganshin S. 2019b. *Efficiency of Introducing a Steam Screw-Rotor Machine to the Heating Power Plant Circuit*. E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE), V. 140, pp. 1–4.
11. Vankov JV, Rotach RR, Laptev SV. Introduction of a Steam Screw-Rotor Machine to Improve the Energy and Economic Efficiency of Chemical Enterprises: *International Journal of Technology (IJTech)*. 2020;11:8.
12. Antonio Giuffrida. Improving the semi-empirical modelling of a single-screw expander for small organic Rankine cycles: *Applied Energy*. 2017. V. 193.
13. Giuseppe Bianchi, Stuart Kennedy, Obadah Zaher, Savvas A. Tassou, Jeremy Miller, Hussam Jouhara. Numerical modeling of a two-phase twin-screw expander for Trilateral Flash Cycle applications: *International Journal of Refrigeration*. 2018. V. 88.
14. Dumont O, Parthoens A. Experimental investigation and optimal performance assessment of four volumetric expanders (scroll, screw, piston and roots) tested in a small-scale organic Rankine cycle system: *Energy*. 2018;165(A):1119-1127.
15. Li G, Lei B, Wu Yu. Influence of inlet pressure and rotational speed on the performance of high pressure single screw expander prototype: *Energy*. 2018;147:279-285.
16. Diao A, Wang Yu, Guo Yu. Development and application of screw expander in natural gas pressure energy recovery at city gas station: *Applied Thermal Engineering*. 2018;142:665-673.

**Authors of publication**

**Rita R. Rotach** – graduate student, Kazan State Power Engineering University.

**Yurii V. Vankov** – doctor of technical sciences, professor, Department of Industrial heat power and heat supply systems, Kazan state power engineering university.

**Получено**

**31.03.2022г.**

**Отредактировано**

**01.04.2022г.**

**Принято**

**04.04.2022г.**