

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 620.93

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА, ВКЛЮЧАЮЩЕГО ПРОМЫШЛЕННО-ОТОПИТЕЛЬНУЮ КОТЕЛЬНУЮ И ВИНТОВУЮ РАСШИРИТЕЛЬНУЮ МАШИНУ

Ротач Р.Р., Ваньков Ю.В., Валиев Р.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
rita-nurkaeva@mail.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В России имеется потенциал энергосбережения, который достигает примерно третьей части текущего расхода электроэнергии, и есть возможности существенного увеличения финансовой рентабельности проектов в сфере энергетики. *ЦЕЛЬ.* Разработка методики, позволяющей определить энергетические показатели при совместной работе паровых котлов, винтовой расширительной машины (ВРМ) и тепловой сети.

*МЕТОДЫ.* Для реализации поставленной цели применено последовательное использование методов расчета тепловых схем энергообъектов, систем теплоснабжения, а также режимных и выходных параметров энергетического оборудования.

*РЕЗУЛЬТАТЫ.* По результатам расчета были получены зависимости расхода пара на сетевые подогреватели и электрической мощности ВРМ от температуры наружного воздуха с учетом ограничений по температурному графику тепловой сети, а также максимальной паропроизводительности котлов.

*ВЫВОДЫ.* Вариант модернизации промышленно-отопительной котельной с установкой ВРМ после паровых котлов является энергосберегающим решением, поскольку позволяет в период использования покрывать нагрузку на отопление, вентиляцию и ГВС, а также вырабатывать электрическую энергию на покрытие собственных нужд котельной.

**Ключевые слова:** винтовая расширительная машина; винтовой детандер; тепловая сеть; паровой котел; энергетические показатели.

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2023-291 от 16.01.2023 года.

**Для цитирования:** Ротач Р.Р., Ваньков Ю.В., Валиев Р.Н. Методика расчета энергетических показателей энергокомплекса, включающего промышленно-отопительную котельную и винтовую расширительную машину // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 2 (58). С.3-15.

## METHODOLOGY FOR CALCULATION OF ENERGY INDICATORS OF THE ENERGY COMPLEX, INCLUDING INDUSTRIAL HEATING BOILER AND SCREW EXPANSION MACHINE

RR. Rotach, YuV. Vankov, RN. Valiev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
rita-nurkaeva@mail.ru

**Abstract:** *RELEVANCE.* Russia has the potential for energy savings, which reaches about a third of the current electricity consumption, and there are opportunities to significantly increase the financial profitability of projects in the energy sector. *PURPOSE.* Development of a methodology that allows determining energy performance in the joint operation of steam boilers, a screw expansion machine (SEM) and a heating network.

**METHODS.** To achieve this goal, the consistent use of methods for calculating thermal schemes of power facilities, heat supply systems, as well as regime and output parameters of power equipment was applied.

**RESULTS.** According to the results of the calculation, the dependences of the steam consumption on the network heaters and the electrical power of the SEM on the outdoor air temperature were obtained. Taking into account the comparison of the obtained dependencies and the imposition of restrictions on the temperature schedule of the heating network, as well as the maximum steam output of the boilers.

**CONCLUSIONS.** The option of upgrading an industrial heating boiler house with the installation of a SEM after steam boilers is an energy-saving solution, since it allows covering the load for heating, ventilation and hot water during the period of use, as well as generating electricity for the boiler house's own needs

**Keywords:** screw expansion machine (SEM); screw expander; heating network; steam boiler; energy indicators.

**Acknowledgments:** This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2023-291 from 16.01.2023.

**For citation:** Rotach RR, Vankov YuV, Valiev RN. Methodology for calculation of energy indicators of the energy complex, including industrial heating boiler and screw expansion machine. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):3-15.

### **Введение (Introduction)**

В России имеется потенциал энергосбережения, который достигает примерно третьей части текущего расхода электроэнергии, и есть возможности существенного увеличения финансовой рентабельности проектов в сфере энергетики [1].

Потребление энергии в России имеет свои особенности [2]:

1. 2/3 территории страны не имеют централизованного снабжения тепловой и электрической энергией. Тарифы на электрическую энергию в удаленных населенных пунктах достигают значений 23- 25 руб./кВт·ч.

2. Более половины регионов испытывают дефицит энергоресурсов и электрической энергии и вынуждены закупать топливо и импортировать электроэнергию.

3. Газифицировано не более 50% населенных пунктов, в сельской местности не более 35%.

Большая часть электрической и тепловой энергии вырабатывается на тепловых и атомных электрических станциях в комбинированном режиме в силовых агрегатах высокой мощности. Это позволяет сделать процесс выработки тепло-и электроэнергии экономичнее.

Вместе с тем, крупные энергетические комплексы имеют следующие недостатки [2]:

1. Тариф на электрическую энергию складывается из четырех составляющих: стоимость непосредственного производства электроэнергии генерирующими компаниями, стоимость передачи электроэнергии электросетевыми компаниями, инфраструктурные платежи системному оператору, сбытовая надбавка гарантирующему поставщику. Из всех четырех составляющих только 50% приходится на первую составляющую, на производство. Порядка 30% стоимости приходится на потери электроэнергии при передаче на дальние расстояния. Таким образом, высокая эффективность оборудования крупных энергопредприятий снижается из-за высоких издержек в процессе энергоснабжения потребителей.

2. Существующие энергосистемы являются высокоинерционными, поэтому им сложно обеспечивать изменения суточных графиков потребления энергии без весомых потерь.

Данные условия создают предпосылки для перехода от единой энергетической системы к малой распределенной энергетике.

В РФ являются действующими примерно 75 тысяч котельных, однако 46% тепловой и 30,6% электрической энергии вырабатывается на теплоэлектроцентралях, то есть в теплофикационном режиме. Поэтому в приоритете на будущее должен стать отказ от строительства новых котельных. Действующие же котельные необходимо достраивать до мини-ТЭЦ с применением схем когенерации [3].

Особый интерес представляют собой промышленно-отопительные котельные с паровыми котлами. Котлы, как правило, вырабатывают пар с давлением 1,3-1,4 МПа. Однако потребителям в основном требуется пар с более низким давлением (0,3-0,4 МПа). Для снижения давления пара используются редукционные устройства (РУ). В процессе дросселирования в РУ пар теряет свою потенциальную энергию, которую можно было бы полезно использовать. Для полезного использования потенциальной энергии пара необходимо установить детандер для выработки электрической энергии, тем самым достроив котельную до энергокомплекса малой распределенной генерации энергии [4].

*Целью работы* является разработка методики, позволяющей определить энергетические показатели при совместной работе паровых котлов, винтовой расширительной машины (ВРМ) и тепловой сети.

*Научная и практическая новизна исследования.* При применении разработанной методики были получены зависимости выработки электрической энергии ВРМ, а также расхода пара на сетевые подогреватели при изменении температуры наружного воздуха с учетом температурного графика тепловой сети.

#### ***Литературный обзор (Literature review)***

Впервые детандеры стали применяться в производстве электрической энергии в середине XX века по предложению М.Д. Миллионщикова. Идея заключалась в использовании в детандере потенциальной энергии избыточного давления транспортируемого природного газа для выработки электроэнергии [5].

В настоящее время наибольшее распространение имеют поршневые детандеры и турбодетандеры, которые успешно эксплуатируются в различных установках на разнообразных газах и весьма широком диапазоне давлений и температур. В связи с расширением области использования детандеров к ним предъявляются специфические требования, например, расширение влажного или запыленного газа, работа на переменных режимах, которые не могут быть выполнены поршневыми детандерами и турбодетандерами без значительного снижения эффективности. Поэтому появилась необходимость в разработках, изготовлении и исследовании новых типов детандеров, которые обеспечили бы выполнение специфических требований при сохранении высокой эффективности, простоте и надежности конструкции [6].

Одним из перспективных типов детандеров является винтовой детандер. По конструкции он аналогичен винтовому компрессору и состоит из тех же основных узлов и деталей, отличаясь лишь отдельными элементами, что обусловлено особенностями рабочего процесса и условиями эксплуатации.

В 1934 году А. Лисхольм запатентовал конструкцию, принцип действия и профиль винтового зацепления сконструированного им винтового компрессора. Однако было обнаружено, что профиль зубьев винтового зацепления, образованный кривыми обкатками двух поверхностей, создавал серьезные затруднения для дальнейшего развития винтовых компрессоров [7].

В 1947 году фирмой SRM (Швеция) была запатентована новая форма профиля зубьев винтового зацепления, кругового симметричного. Использование этого профиля позволило значительно упростить технологический процесс изготовления винтов [7].

Большой вклад в исследование профилей зубьев винтового зацепления было сделано И.А. Сакуном.

И.А. Корнев в своих работах получил экспериментальные характеристики винтового детандера, разработал метод индцирования. Был проведен анализ и оценка степени влияния различных факторов на эффективность винтового детандера. Проведены практические мероприятия по повышению эффективности винтового детандера.

Репин А.Л. разработал математическую модель винтового детандера, на основании которой была также разработана методика расчета рабочих характеристик по водяному пару, которая учитывала непостоянство массы рабочего тела, явление конденсации в парных полостях детандера и образование жидкой фазы в потоке пара. Также Репиным был выполнен анализ работы ВРМ в связке с системой теплоснабжения. Были проанализированы возможности регулирования режима работы ВРМ при подключении и отключении тепловых потребителей.

Березин С.Р., Носков А.Н., Г.А. Щеглов в работе [8] предложили методику определения показателей рабочего процесса винтового детандера, учитывающую теплообмен перегретого и влажного пара со стенками детандера, а также потери рабочего тела, возникающих в результате дросселирования сквозь зазоры рабочих органов детандера.

В начале изучения винтовой машины большая часть исследований по термодинамике и винтовой механике была сосредоточена на винтовом компрессоре, а исследования

винтового расширителя были относительно небольшими. На основании большого количества экспериментальных данных Стосич и Смит в работе [9] исследовали параметры и термодинамическую модель винтового расширителя. Однако точность этой модели была низкой, поскольку они не учитывали влияние утечек, трения, теплового обмена масла и газа и других факторов.

Гуфрида и соавторы в работах [10-12] рассмотрели утечки рабочего тела в процессе расширения винтовом детандере. Также ими была разработана термодинамическая модель процессов, происходящих винтовом расширителе уже с учетом утечек рабочего тела и его теплообмена со стенками ВРМ.

Тиан и соавторы в [13] разработали термодинамическую математическую модель для изучения производительности винтового детандера в изменяющихся условиях эксплуатации. При моделировании учитывались потери давления на всасывании, а также утечки и теплообмен в процессе расширения. Результаты моделирования показывают, что коэффициент заполнения колеблется в пределах 0,82–0,88, а изоэнтропический КПД колеблется в пределах 0,73–0,83, что доказывает, что винтовой детандер является эффективной технологией.

Гуо и соавторы в работе [14] построили математическую модель процесса расширения винтового детандера. На основе математической модели методом численного моделирования изучено влияние площади поперечного сечения впускного и выпускного отверстий и коэффициента лобового сопротивления на эффективность винтового детандера.

Анализ литературы показывает, что множество работ посвящено изучению термодинамических процессов и геометрических параметров ВРМ. Одновременно с этим наблюдается недостаток исследований энергокомплексов с применением винтовых машин, имеющих специфические особенности изменения энергетических характеристик.

**Методика (Methodology)**

На рис.1 представлена схема методики расчета энергетических показателей энергетического комплекса, состоящего из промышленно- отопительной котельной, ВРМ и тепловой сети.

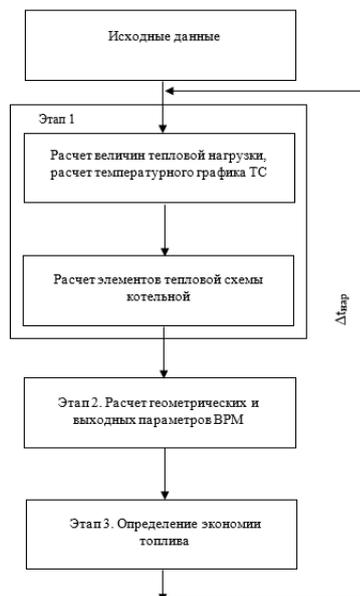


Рис. 1. Методика расчета энергетических показателей.

Fig. 1. Methodology for calculating energy indicators.

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors

**Расчет первого этапа.**

На первом этапе определяются максимальная часовая нагрузка на систему отопления. Производится расчет температурного графика тепловой сети. Так же на данном этапе рассчитываются показатели тепловой схемы производственно-отопительной котельной. Как итог данного этапа – определение расхода пара на сетевые подогреватели.

1.Расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию в час в зависимости от температуры наружного воздуха, МВт

$$Q_o^u = Q_{O\max} \frac{t_{\text{в.р}} - t_n}{t_{\text{в.р}} - t_{\text{р.о}}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{в}}^u = Q_{V\max} \frac{t_{\text{в.р}} - t_n}{t_{\text{в.р}} - t_{\text{р.в}}} \quad (2)$$

где  $Q_{O\max}$  – максимальная нагрузка на отопление, МВт;  $Q_{V\max}$  – максимальная нагрузка на вентиляцию, МВт;  $t_{\text{в.р}}$  – расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы вентиляции, °С;  $t_n$  – температура наружного воздуха, °С;  $t_{\text{р.о}}$  – расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы отопления, °С;  $t_{\text{р.в}}$  – расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы вентиляции, °С.

2. Среднечасовой расход тепла на ГВС, МВт

$$Q_{\text{г.в.}}^u = \frac{m \cdot a \cdot c_p \cdot (t_{\text{г}} - t_{\text{х}}) \cdot 10^{-3}}{T \cdot 3600} \cdot \varepsilon \quad (3)$$

где  $m$  – количество потребителей горячей воды, чел;  $a$  – среднесуточная норма расходов горячей воды на одного потребителя, л/сут.;  $c_p$  – массовая теплоемкость воды, кДж/(кг·К);  $t_{\text{г}}$  – температура горячей воды, по которой устанавливается норма потребления, °С;  $t_{\text{х}}$  – температура холодной воды, принимаемая для отопительного периода +5°С, для летнего +15°С;  $\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий снижение среднечасового расхода воды на ГВС в летний период по отношению к отопительному;  $T$  – период потребления горячей воды в течение суток, ч.

3. Общая часовая тепловая нагрузка, МВт:

$$Q_{\text{сум}}^u = Q_o^u + Q_{\text{в}}^u + Q_{\text{г.в.}}^u \quad (4)$$

4. Расчётные зависимости для построения температурного графика тепловой сети

$$\tau_{10} = t_{\text{в.р.}} + \Delta t \cdot \left( \frac{t_{\text{в.р.}} - t_n}{t_{\text{в.р.}} - t_{\text{р.о}}} \right)^{0,8} + (\Delta \tau - 0,5 \cdot \theta) \cdot \left( \frac{t_{\text{в.р.}} - t_n}{t_{\text{в.р.}} - t_{\text{р.о}}} \right) \quad (5)$$

$$\tau_{20} = t_{\text{в.р.}} + \Delta t \cdot \left( \frac{t_{\text{в.р.}} - t_n}{t_{\text{в.р.}} - t_{\text{р.о}}} \right)^{0,8} - 0,5 \cdot \theta \cdot \left( \frac{t_{\text{в.р.}} - t_n}{t_{\text{в.р.}} - t_{\text{р.о}}} \right) \quad (6)$$

где  $\Delta t$  – расчетная средняя разность температур отопительного прибора, вычисляемая по формуле:

$$\Delta t = \frac{\tau_{03}' + \tau_{02}'}{2} - t_{\text{сп}} \quad (7)$$

где  $\tau_{03}'$ ,  $\tau_{02}'$  – температуры воды после элеватора и в обратной магистрали тепловой сети, вычисляемые при  $t_{\text{р.о}}$

где  $\Delta \tau$  – расчетный перепад температур в тепловой сети:

$$\Delta \tau = \tau_{01}' - \tau_{02}' \quad (8)$$

где  $\tau_{01}'$  – температура воды в подающей магистрали тепловой сети, вычисляемая при  $t_{\text{р.о}}$

где  $\theta$  – расчетный перепад температур в отопительных приборах:

$$\theta = \tau'_{03} - \tau'_{02} \quad (9)$$

5. Расчетный часовой расход сетевой воды в зимнем режиме, МВт

$$G_{сет} = \frac{Q_{сум}^q \cdot 3600}{(\tau_{1max} - \tau_{2max}) \cdot c_g} \quad (10)$$

где  $\tau_{1max}$ ,  $\tau_{2max}$  – максимальная температура воды в подающем и обратном трубопроводах соответственно, °С;  $c_g$  – теплоемкость воды, кДж/(кг·°С).

6. Объем сетевой воды в системе теплоснабжения, м<sup>3</sup>

$$G_{сист} = g_{сист} \cdot Q_{сум}^q \quad (11)$$

где  $g_{сист}$  – удельный объем воды в системе теплоснабжения на отопление, вентиляцию и ГВС, принимается 30 м<sup>3</sup>/МВт.

7. Расход подпиточной воды на восполнение утечек тепловой сети, м<sup>3</sup>/ч

$$G_{ум} = \frac{0,5}{100} \cdot G_{сист} \quad (12)$$

8. Количество обратной сетевой воды, м<sup>3</sup>/ч

$$G_{сет.обр} = G_{сет} - G_{ум} \quad (13)$$

9. Температура обратной сетевой воды перед сетевыми насосами, °С

$$t_3 = \frac{\tau'_{02} - G_{сет.обр} + t_0 \cdot G_{ум}}{G_{сет}} \quad (14)$$

где  $t_0$  – температура воды после деаэратора (в среднем принимается 104 °С).

10. Расход пара на подогреватели сетевой воды, т/ч

$$D_{псв} = G_{сет} \cdot \frac{c_g \cdot (\tau_1 - t_3)}{(h_2 - h_k) \cdot \eta} \quad (15)$$

где  $\eta$  – КПД сетевого подогревателя., для сетевых подогревателей КПД принимается равным 0,98;  $c_g$  – теплоемкость воды, кДж/(кг·°С);  $\tau_1$  – температура воды в подающем трубопроводе, °С;  $h_2$  – энтальпия пара после РОУ, кДж/кг;  $h_k$  – энтальпия конденсата после пароводяного подогревателя сырой воды, кДж/кг.

#### Расчет второго этапа

На втором этапе, учитывая результаты расчета этапа 1, производится расчет геометрических и выходных параметров ВРМ. Конечный итог расчета – определение количества ВРМ и электрическая мощность каждого агрегата.

Перед расчетом нужно учесть, что на выходе из ВРМ необходимо получить пар тех же параметров, что и после РОУ. Расход пара после ВРМ равен  $D_{псв}$

1. Удельный объём одного рабочего пространства, м<sup>3</sup> [15]

$$V_h = 0,1144 \cdot D^2 \cdot L \quad (16)$$

где  $D$  – диаметр роторов ВРМ, м;  $L$  – длина роторов ВРМ, м

2. Теоретический расход пара через ВРМ, кг/с [15]

$$G_{теор} = \frac{4 \cdot V_h}{\varepsilon} \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{\mathcal{G}_1} \quad (17)$$

где  $\frac{4 \cdot V_h}{\varepsilon}$  – объем четырех парных полостей в момент отсечки впускного окна за 1 оборот ведущего ротора;  $n$  – число оборотов ведущего ротора;  $\mathcal{G}_1$  – удельный объем газа во впускном окне.

3. Внутренняя мощность ВРМ без учета утечек пара, кВт

Расчет ведется для максимально зимнего режима, чтобы оценить максимальную мощность генератора

$$N_i = G_{теор} \cdot (h_n - h_k) \quad (18)$$

где  $h_n$ ,  $h_k$  – энтальпия пара при входе и на выходе из ВРМ, кДж/кг.

Значение электрической мощности винтовой машины определяется за вычетом механических потерь элементов комплекса и электрических потерь в генераторе.

Механические потери складываются из потерь на трение роторов, синхронизирующих шестерен ВРМ и потерь на трение в электрогенераторе.

4. Мощность на валу ВРМ, кВт:

$$N_6 = N_i - \Delta N_{мех} \quad (19)$$

где  $\Delta N_{мех}$  – механические потери ВРМ

5. Электрическая мощность ВРМ, кВт

$$N_{эл} = N_6 - \Delta N_{эз} \quad (20)$$

где  $\Delta N_{эз}$  – механические потери в электрогенераторе

6. Адиабатический КПД ВРМ:

$$\eta_{ад} = \frac{h_n - h_k}{h_n - h_{2ад}} \quad (21)$$

где  $h_n$ ,  $h_k$  – энтальпия пара при входе и на выходе из ВРМ, кДж/кг;  $h_{2ад}$  – энтальпия пара при адиабатном процессе.

7. Внешний КПД двигателя:

$$\eta_0 = \eta_{ад} \cdot \eta_{мех} \quad (22)$$

где  $\eta_{мех}$  – механический КПД ВРМ, принимаемый 0,95.

8. Абсолютный КПД комплекса, состоящего из котельной установки, ВРМ и электрогенератора

$$\eta_0 = \eta_{ку} \cdot \eta_0 \cdot \eta_{ген} \quad (23)$$

где  $\eta_{ку}$  – КПД котельной установки,  $\eta_{ген}$  – КПД генератора

*Расчет третьего этапа.*

Как правило, ВРМ устанавливается параллельно существующим на предприятии РОУ, поэтому на третьем этапе возможно для сравнения рассчитать экономию условного топлива от использования ВРМ взамен существующих РОУ.

Необратимые потери в РОУ в процессе дросселировании пара вычисляются по формуле, кВт:

$$P_{РОУ} = D_n \cdot (h_n - h_{н'}) - T_{oc} \cdot (s_n - s_{н'}) \quad (24)$$

где  $h_n$  – энтальпия пара на входе в РОУ, кДж/кг;  $h_{н'}$  – энтальпия пара на выходе из РОУ, кДж/кг;  $s_n$  – энтропия пара на входе в РОУ, кДж/К;  $s_{н'}$  – энтропия пара на выходе из РОУ, кДж/К;  $D_n$  – расход пара через РОУ, кг/ч;  $T_{oc}$  – температура окружающей среды.

Потери условного топлива (часовые) в котельной в процессе дросселирования пара в РОУ определяются по формуле, кг.у.т.:

$$\Delta B_{РОУ} = \frac{P_{РОУ}}{Q_y \cdot \eta_{ку} \cdot \eta_{изол}} \quad (25)$$

где  $Q_y$  – теплота сгорания условного топлива (равная 29300 кДж/кг);  $\eta_{ку}$  – КПД котельной установки;  $\eta_{изол}$  – КПД изоляции паропроводов энергетического объекта.

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии составит, кг.у.т/кВт·ч:

$$B_{уд} = \frac{0,123}{\eta_{э}} \quad (26)$$

### **Результаты расчетов (Calculation results)**

По изложенной методике были проведены расчеты энергетических параметров ВРМ на примере котельного цеха (КЦ-2) г. Нефтекамска.

КЦ-2 осуществляет центральное качественное регулирование отпуска тепловой энергии в городские тепловые сети. Количество отпускаемой тепловой энергии для нужд отопления зависит от изменения температуры теплоносителя в тепловой сети, которое, в свою очередь, зависит от изменения температуры наружного воздуха. При этом расход теплоносителя остается постоянным.

Предлагается рассмотреть вариант установки ВРМ после паровых котлов для получения пара необходимых параметров для подогрева воды в сетевых подогревателях для нужд отопления, вентиляции и ГВС. Схема установки ВРМ в тепловую схему котельной представлена в [16]. Выработанная в генераторе ВРМ электроэнергия будет направлена на частичное покрытие собственных нужд котельной.

Все исходные данные для расчета приведены в Таблице 1.

Таблица 1  
Table 1

Исходные данные для КЦ-2, г. Нефтекамск\*  
Initial data for boiler house No. 2, Neftekamsk

Параметр	Обозначение	Значение
Расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления	$t_{p.o}$	-38
Расчетная температура наружного воздуха для проектирования вентиляции	$t_{p.v}$	-21
Температура внутри отапливаемого помещения	$t_{в.п}$	18
Максимальная температура прямой сетевой воды	$t_{1max}$	130

Таблица 1  
Table 1

Максимальная температура обратной сетевой воды	$t_{2\max}$	70
Нагрузка на отопление, МВт	$Q_{o.\max}$	193,2
Нагрузка на вентиляцию, МВт	$Q_{в.\max}$	6,6
Нагрузка на ГВС, МВт	$Q_{гвс}$	13,8
<i>Параметры пара, вырабатываемого котлами</i>		
Температура, °С	$t_1$	194
Давление, МПа	$p_1$	1,3
Энтальпия, кДж/кг	$h_1$	2809,65
<i>Параметры пара после РОУ</i>		
Температура, °С	$t_2$	133
Давление, МПа	$p_2$	0,3
Энтальпия, кДж/кг	$h_2$	2724,9
Энтальпия конденсата после пароводяного подогревателя сырой воды, кДж/кг	$h_k$	389

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors.

По результатам расчетов был рассчитан температурный график тепловой сети, определена точка излома  $t_{изл}$ , равная  $-3,5^{\circ}\text{C}$ .

Также по вышеизложенной методике были проведены расчеты, на основе которых были получены зависимости расхода пара на сетевые подогреватели и выработки электрической энергии ВРМ от температуры наружного воздуха. Однако важно учесть, что до достижения точки излома, температура в подающем трубопроводе не снижается ниже  $70^{\circ}\text{C}$ . То есть в диапазоне температур от  $+8^{\circ}\text{C}$  до  $-3,5^{\circ}\text{C}$  температура в подающем трубопроводе будет  $70^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, минимальный расход пара на сетевые подогреватели и минимальное значение мощности ВРМ соответствуют значению  $t_{изл}$ , и составляют соответственно 46,5 т/ч и 784 кВт.

Также, конкретно для случая с КЦ-2, необходимо учитывать еще одно ограничение: максимальная суммарная паропроизводительность паровых котлов составляет 80 т/ч. Без учета утечек, данный расход соответствует температуре наружного воздуха  $-10^{\circ}\text{C}$  и определяет максимальную электрическую мощность ВРМ, равную 1234 кВт.

Таким образом, по результатам выполненных расчетов следует вывод о том, что ВРМ может работать в температурном диапазоне наружного воздуха от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+8^{\circ}\text{C}$ .

Полученные зависимости с учетом всех ограничений представлены на рис.2 и рис.3 соответственно.

Для рассмотренного случая потенциально возможно установить ПВМ-1500 производства фирмы «ВМ-Энергия» или ПВМ-1.5 производства «ВТ Технологии».

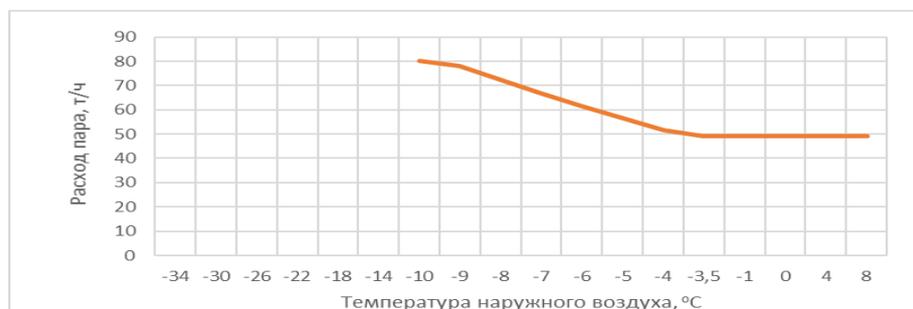


Рис. 2. Зависимость расхода пара на сетевые подогреватели от температуры наружного воздуха

Fig. 2. Dependence of steam consumption for network heaters on the outdoor air temperature

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors

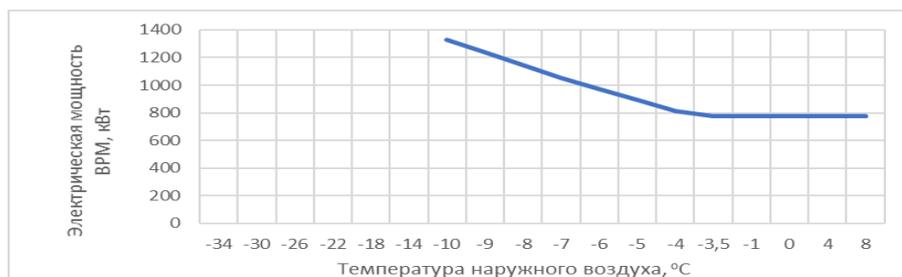


Рис. 3. Зависимость электрической мощности ВРМ от температуры наружного воздуха.

Fig. 3. The dependence of the electric power of the SEM on the outdoor temperature.

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors.

По средней продолжительности периода с температурой воздуха различных градаций в СНиП 23-01-99 (2006) было определено число часов работы ВРМ в температурном диапазоне от +8°C до -10°C, равное 3621 час. Также для каждого температурного промежутка была определена электрическая мощность ВРМ. Результаты расчетов приведены в Таблице 2.

Таблица 2  
Table 2

Периоды работы ВРМ и ее энергетические характеристики\*  
Periods of SEM operation and its energy characteristics

Диапазон температур, °C	Продолжительность периода, ч	Расчетная электрической мощность ВРМ, кВт	Выработка электроэнергии за период стояния температур, тыс.кВт·ч
6÷7,9	351	784	275,1
4÷5,9	359	784	281,5
2÷3,9	394	784	308,8
0÷-1,9	614	784	481,4
-2÷-0,1	491	784	384,9
-4÷-2,1	421	784	330,1
-6÷-4,1	386	892	344,3
-8÷-6,1	307	1056	324,2
-10÷-8,1	298	1234	367,7
	<b>3621</b>		<b>3098</b>

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors

Таким образом, включение ВРМ в схему работы паровых котлов КЦ-2 г. Нефтекамска возможно в температурном диапазоне от +8°C до -10°C. При этом в данном диапазоне температур будут покрыты все нужды потребителей на отопление, вентиляцию и ГВС. Время работы ВРМ составит 3621 час. Выработка электроэнергии на собственные нужды котельной составит 3098 тыс.кВт·ч. Дальнейшее понижение температуры наружного воздуха приведет к необходимости переключения на водогрейные котлы или, как вариант, включению одного или нескольких водогрейных котлов для покрытия необходимой нагрузки системы отопления.

Согласно таблице 2 примерное время работы ВРМ в году – с начала октября до конца апреля, т.е. практически весь отопительный период. За этот период среднее потребление электроэнергии КЦ-2 на собственные нужды составит 9100 тыс.кВт·ч. Таким образом, внедрение ВРМ на этом объекте позволит покрывать 34% собственных нужд в электроэнергии в период с октября по апрель.

Также необходимо отметить, что при использовании РОУ за 3621 час было бы потеряно 5056 МВт тепловой энергии (согласно формулам 24-25), что соответствует 904 тоннам условного топлива. При использовании ВРМ потерянное тепло используется на производство электроэнергии.

#### Закключение (Conclusion)

В России имеется достаточно большой потенциал энергосбережения. На сегодняшний день в нашей стране основными производителями электрической и тепловой энергии являются крупные ТЭЦ, ТЭС и ГЭС с высокой единичной мощностью

энергоагрегатов. Однако при всей эффективности энергооборудования этих комплексов передача электроэнергии на дальние расстояния ведет к большим потерям как в энергетическом, так и в экономическом плане. В таких условиях важное значение приобретает малая распределенная энергетика. Особое внимание следует уделить действующим промышленно-отопительным котельным, которые можно достраивать до мини-ТЭЦ с применением схем когенерации. Для реализации когенерации предлагается использовать детандеры, в особенности винтовые, поскольку они показывают хорошие термодинамические характеристики при работе на влажном паре.

Из обзора литературы следует, что имеется положительный опыт применения ВРМ как в России, так и за рубежом. Большая часть исследований посвящена рассмотрению конструкций и термодинамических процессов, происходящих в детандере. Однако мало исследований направлено на практическое использование ВРМ.

Была разработана методика расчета энергетических показателей энергетического комплекса, состоящего из паровых котлов, ВРМ и тепловой сети. Данная методика позволяет рассчитывать выработку электрической энергии и расход пара на сетевые подогреватели промышленно-отопительной котельной в зависимости от температуры наружного воздуха и с учетом температурного графика тепловой сети. Если ВРМ устанавливается параллельно РОУ, рассчитывается экономия условного топлива.

По результатам расчета были получены зависимости расхода пара на сетевые подогреватели и электрической мощности ВРМ от температуры наружного воздуха. С учетом сопоставления полученных зависимостей и наложения ограничений по температурному графику тепловой сети, а также максимальной паропроизводительности котлов установлено: включение ВРМ после паровых котлов в КЦ-2 г. Нефтекамск для полного покрытия нагрузки на отопление, вентиляцию и ГВС возможно в температурном диапазоне наружного воздуха от +8°C до -10°C. Для дальнейшего полного покрытия нагрузки потребителей необходимо подключение водогрейных котлов. При этом выработанная электроэнергия позволит покрыть 34% собственных нужд котельной.

#### Литература

1. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 г.
2. Ефимов Н.Н., Попель О.С., Балтян В.Н. Перспективы развития малой распределенной энергетики // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2015. №1 (182).
3. Илюшин П.В. Системный подход к развитию и внедрению распределённой энергетики и возобновляемых источников энергии в России // Open Journal Systems. 2022. №4. с.20-27.
4. Стенников В. А., Воропай Н. И. Централизованная и распределенная генерация – не альтернатива, а интеграция. Раздел 4.2. Инновационная электроэнергетика – 21. М., 2015. URL: [http://www.energystrategy.ru/projects/energy\\_21.htm](http://www.energystrategy.ru/projects/energy_21.htm)
5. 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.46-49.6.
6. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. Нетрадиционные источники электроэнергии в составе систем гарантированного электроснабжения. Промышленная энергетика. 2014. №1. С. 88-95.
7. Миникаев А. Ф., Пронин В. А., Жигновская Д. В., Кузнецов Ю. Л. Использование методов компьютерного моделирования для разработки профилей рабочих органов винтового однороторного компрессора // Вестник Международной академии холода. 2018. № 1. С. 61–66.
8. Березин С.Р., Носков А.Н., Щеглов Г.А. Определение показателей рабочего процесса паровой винтовой машины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 1. С. 50-56.
9. Smith, I.K.; Stošić, N.; Aldis, C.A. Development of the trilateral flash cycle system. Part 3: The design of high-efficiency two-phase screw expanders. J. Power Energy 2018, 210, 75–93.
10. Giuffrida, A. Improving the semi-empirical modelling of a single-screw expander for small organic Rankine cycles. Appl. Energy 2018, 193, 356–368.
11. Qi, Y.; Yu, Y.; Hooman, K. Thermodynamic Simulation on the Performance of Twin Screw Expander Applied in Geothermal Power Generation. Energies 2018, 9, 694.
12. Tang, H.; Wu, H.; Wang, X.; Xing, Z. Performance study of a twin-screw expander used in a geothermal organic rankine cycle power generator. Energy 2020, 90, 631–642.

13. Tian, Y.; Xing, Z.; He, Z.; Wu, H. Modeling and performance analysis of twin-screw steam expander under fluctuating operating conditions in steam pipeline pressure energy recovery applications. *Energy* 2019, 141, 692–701.

14. Guo, S.; Ying, Z.; Shi, B.; Zhu, Y.; Pan, L. Effect of inlet vent on screw expander efficiency. *Sci. Technol. Innov. Her.* 2017, 23, 1–4.

15. Березин С.Р. Винтовые детандеры: учебное пособие. Уфа, УГАТУ. 2010. 53 с.

16. 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.

#### Авторы публикации

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

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

**Валиев Радик Нурттинович** – канд. технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035.
2. Efimov NN, Popel OS, Baltyan VN. Prospects for the development of small distributed energy. *Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Series: Engineering sciences.* 2015;41(182).
3. Ilyushin PV. A systematic approach to the development and implementation of distributed energy and renewable energy sources in Russia. *Open Journal Systems.*2022;4;20-27.
4. Stennikov VA, Voropay NI. Centralized and distributed generation is not an alternative, but integration. Section 4.2. *Innovative power industry – 21.* М., 2015. URL: [http://www.energystrategy.ru/projects/energy\\_21.htm](http://www.energystrategy.ru/projects/energy_21.htm)
5. Kalinin NV, Zhigulina EV., Martynov AV. Efficiency of expansion machines in plants and systems. *Reliability and security of energy.* 2017;4(35):46-49.
6. Grigorash OV, Bogatyrev NI, Kurzin NN. Non-traditional sources of electricity as part of uninterrupted power supply systems. *Industrial energy.* 2014;1:88-95.
7. Minikayev AF, Pronin VA, Zhignovskaya DV, et al. The use of computer modelling for the development of the working bodies' profiles for screw single-rotor compressor. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda.* 2018;1:61–66.
8. 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.
9. Smith, IK, Stošić N, Aldis C.A. Development of the trilateral flash cycle system. Part 3: The design of high-efficiency two-phase screw expanders. *J. Power Energy* 2018, 210, 75–93.
10. Giuffrida, A. Improving the semi-empirical modelling of a single-screw expander for small organic Rankine cycles. *Appl. Energy* 2018;193:356–368.
11. Qi Y, Yu Y, Hooman K. Thermodynamic Simulation on the Performance of Twin Screw Expander Applied in Geothermal Power Generation. *Energies.* 2018, 9, 694.
12. Tang, H, Wu, H, Wang, X, Xing, Z. Performance study of a twin-screw expander used in a geothermal organic rankine cycle power generator. *Energy.* 2020;90:631–642.
13. Tian, Y, Xing Z, He Z, Wu H. Modeling and performance analysis of twin-screw steam expander under fluctuating operating conditions in steam pipeline pressure energy recovery applications. *Energy.* 2019;141:692–701.
14. Guo S, Ying, Z, Shi B, et al. *Effect of inlet vent on screw expander efficiency.* Sci. Technol. Innov. Her. 2017, 23, 1–4.
15. Berezin SR. Screw expanders: tutorial. Ufa, USATU, 2010. P.53.

16. 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.

**Authors of the publication**

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

**Yury V. Vankov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Radik N. Valiev** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы*

**Получено** **20.03.2023г.**

**Отредактировано** **27.03.2023г.**

**Принято** **09.06.2023г.**