



## **ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ / AGROENGINEERING SYSTEMS OF PROCESSES AND MACHINES**

УДК 621.182.3

DOI: 10.15507/0236-2910.027.201704.577-591

### **Оценка влияния порядка работы котлоагрегатов на их групповой удельный расход топлива**

**А. П. Левцев<sup>1\*</sup>, О. А. Кручинкина<sup>1</sup>, Ши Юаньюань<sup>1-2</sup>**<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)<sup>2</sup>Университет Дзянсу (г. Чжэньцзян, КНР)

\*levtzevap@mail.ru

*Введение.* Удельный расход топлива (УРТ) для котельной относится к важнейшим показателям эффективности ее работы как в текущем, так и прогнозируемом периодах. С переходом к долгосрочным тарифам значимость данного показателя возрастает. Установка технических узлов учета тепловой энергии от котельных позволила оценивать фактический УРТ за интересующий период с достаточной точностью. Однако задача управления режимами работы котлоагрегатов, позволяющая получить минимальный УРТ, осталась нерешенной. В данной работе предложен алгоритм нахождения оптимального группового УРТ на отпуск тепловой энергии от котельной в зависимости от температуры наружного воздуха, основанный на использовании метода линейного программирования. Составлены режимные карты на примере двух котельных («Центральная» и «Химмаш» АО «МЭК» г. Рузаевка) по режимным картам и по прямым балансам для отдельных котлоагрегатов, позволяющие управлять режимами работы котлоагрегатов с минимальным, средним и максимальным групповым УРТ. Внедрение режимных карт на указанных котельных позволило снизить групповой УРТ до 10 %.

*Материалы и методы.* Исследование групповых УРТ проводилось с использованием результатов технологического аудита АО «МЭК» (г. Рузаевка, отопительный период 2016–2017 гг.). Для анализа были выбраны две квартальных котельных с нагрузками более 10 Гкал/час. Котельная «Центральная» включает 4 котла, котельная «Химмаш» – 3 котла. В процессе работы использовались общенаучные методы, а также методы линейного программирования.

*Результаты исследования.* Чтобы выявить зависимость влияния порядка работы котлоагрегатов на их групповой УРТ, были составлены алгоритм и программа. Данная задача решается методом линейного программирования. Алгоритм нахождения оптимального группового УРТ представляет последовательность шагов. Во-первых, составляется комбинация  $i$ -х котлоагрегатов в  $j$ -х режимах их нагрузки для обеспечения нагрузки котельной, соответствующей  $k$ -й температуре наружного воздуха. Во-вторых, записывается целевая функция и проверяется на экстремум (минимум, максимум, среднее значение), из которой вычисляются комбинации  $i$ -х котлоагрегатов в  $j$ -х режимах их нагрузки для обеспечения нагрузки котельной (при  $k$ -й температуре наружного воздуха), соответствующие минимальному потреблению топлива. Для найденных комбинаций находится групповой УРТ. Алгоритм реализован в табличном редакторе на примере двух котельных г. Рузаевка («Цент-

ральная» и «Химмаш»). Рассчитаны минимальный, максимальный и средний УРТ на выработку тепловой энергии от каждой из котельных в зависимости от температуры наружного воздуха.

**Обсуждение и заключения.** Практика энергетических обследований теплосетевых компаний в системах коммунального теплоснабжения показала, что более половины котлоагрегатов работает в ручном режиме. Групповой фактический УРТ на выработку (отпуск) тепловой энергии в котельной отличается от расчетного, утвержденного в тарифе, на 20 % и более. Одним из эффективных и малозатратных мероприятий по снижению УРТ на отпуск тепловой энергии от котельной является повышение точности соблюдения режимов горения и строгого выполнения порядка работы котлоагрегатов. Последнее достигается за счет разработки режимных карт для котельных, которые составляются по результатам технологического аудита. Задача определения оптимального порядка работы котлоагрегатов с различными индивидуальными УРТ на выработку тепловой энергии от котельных решается методом линейного программирования. В статье предложен алгоритм нахождения оптимального группового УРТ на выработку тепловой энергии от котельной в зависимости от температуры наружного воздуха. Для котельной «Центральная» разница между минимальным и максимальным УРТ составляет 6,8 % по режимным картам и 17,74 % – фактически. Для котельной «Химмаш» разница между минимальным и максимальным УРТ составляет 2,29 % и 13,8 % соответственно. Режимные карты для котельных «Центральная» и «Химмаш» были внедрены на предприятии АО «МЭК», что позволило в режимах малых и средних нагрузок (температура наружного воздуха до -10 °С) снизить потребление газа до 10 %.

**Ключевые слова:** удельный расход топлива, котлоагрегат, метод линейного программирования, режимная карта, тепловая энергия, теплосетевая компания, нагрузка

**Для цитирования:** Левцев А. П., Кручинкина О. А., Юаньюань Ши. Оценка влияния порядка работы котлоагрегатов на их групповой удельный расход топлива // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 4. С. 577–591. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201704.577-591

## Evaluation of Efficiency of Boiler Units in Their Group Specific Fuel Consumption

A. P. Levtshev<sup>a\*</sup>, O. A. Kruchinkina<sup>a</sup>, Shi Yuan Yuan<sup>a-b</sup>

<sup>a</sup>National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

<sup>b</sup>Jiangsu University (Jiangsu, China)

\*levtzevap@mail.ru

**Introduction.** Specific fuel consumption (SFC) for the boiler is the most important performance indicators of the work, both in the current and projected periods. The technical installation of metering stations of thermal energy from the boiler made it possible to evaluate the actual SFC over the period of interest with sufficient accuracy. However, the problem of controlling modes for operation of boiler units, which allows obtaining the minimum SFS remained unresolved. This paper presents the algorithm of finding the optimal group SFC for the boiler depending on the outside temperature. This approach is based on the linear programming method.

**Materials and Methods.** The study of the group specific fuel consumption was carried out using the results of technological audit in Ruzaevka (Republic of Mordovia) in 2016–2017. For analysis we selected two district boiler with loads more 10 Gcal/hour. We used the general scientific methods and methods of linear programming.

**Results.** To reveal the dependence of the effect of the order of operation of boiler units in their group SFC we developed an algorithm and a program. This problem can be solved by linear programming methods. The algorithm for finding the optimal group SFC represents a sequence of steps. The algorithm is implemented using a spreadsheet



program in two boilers in Ruzaevka. We presented the calculated minimum, maximum and average SFC for the production of thermal energy from each of the boiler depending on the outdoor temperature.

*Discussion and Conclusions.* One of the most effective and low-cost measures to reduce SFC for the heat energy from the boiler is to increase the accuracy of the compliance regimes of burning and strict compliance with the order of the boilers. The problem of determining the optimal order of operation of boiler units with a variety of individual SFC for the production of thermal energy from boilers is solved by linear programming. The findings of this study have a number of practical implications in the heating systems.

**Keywords:** specific fuel consumption, boiler, method of linear programming, regime map, heat energy, heat distribution company, load

**For citation:** Levtshev A. P., Kruchinkina O. A., Yuan Yuan Shi. Evaluation of Efficiency of Boiler Units in Their Group Specific Fuel Consumption. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(4):577–591. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201704.577-591

## Введение

Как показывает практика энергетических обследований теплосетевых компаний за последние 5 лет, в системах коммунального теплоснабжения городских и сельских поселений районного масштаба более половины котлоагрегатов работает в ручном режиме. Для приблизительно одинаковых по мощности котельных их групповой фактический удельный расход топлива (УРТ) может различаться до 20 % и более. Одни специалисты в области эксплуатации теплогенерирующих установок относят это к нарушениям режимов работы конкретных котлоагрегатов. Другие отмечают низкое качество режимно-наладочных испытаний котлоагрегатов и недостаточный опыт работы операторов. В процессе технологического аудита работы котлоагрегатов было выявлено, что главной причиной такого положения является несогласованный групповой порядок работы котлоагрегатов и достоверность отслеживания конкретного режима котлоагрегата.

## Обзор литературы

Проблема прогнозирования потребности в топливе для котельных рассматривалась с XX в. Наибольшую известность получили методики, разработанные Академией коммунального хозяйства им К. Д. Памфилова<sup>1</sup>. В последние годы широкое распространение при теплотехнических испытаниях котлов получила методика, разработанная профессором М. Б. Равичем<sup>2</sup>. При расчетах по этой методике не требуется выполнять трудоемкие работы по определению состава и теплоты сгорания топлива, вследствие чего облегчается обработка результатов испытаний. Методика основана на использовании некоторых обобщенных характеристик топлива, подвергающихся незначительным колебаниям при изменении его состава и теплоты сгорания.

Определению норм расхода газа в котельной была еще в 1966 г. посвящена методика, разработанная ВНИИ-Промгаз<sup>3</sup>, а также временная методика

<sup>1</sup> Инструкция по нормированию расхода газа в промышленных котельных малой производительности. Утв. Мин. Газпромом 28.05.1966. ВНИИПромгаз. URL: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/46/46503](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/46/46503)

<sup>2</sup> Временная методика нормирования расхода газа в котлах малой и средней мощности. Утв. Мин. Газпрома 27.01.1982. ВНИИПромгаз. М. : ВНИИЭгазпром, 1983.

<sup>3</sup> Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку тепла отопительными котельными коммунальных предприятий. АКХ им. К. Д. Памфилова. М., 1994. URL: [http://www.os39.ru/file/oksana/metodicheskie\\_ukazaniya\\_po\\_opredeleniyu\\_raskhodov\\_topliva\\_elektroenergii\\_i.pdf](http://www.os39.ru/file/oksana/metodicheskie_ukazaniya_po_opredeleniyu_raskhodov_topliva_elektroenergii_i.pdf)

1983 г.<sup>4</sup> На их основе была разработана методика<sup>5</sup>, которая предполагает определение индивидуальных и групповых удельных норм расхода газа в котельных. В данной методике в качестве одной из мер снижения удельного расхода газа предлагается нахождение оптимальных режимов работы котлов [1–2]. Указанные методики имеют ряд достоинств, однако не учитывают порядка работы котлоагрегатов в котельной.

**Целью работы** является выявление зависимости влияния порядка работы котлоагрегатов на их групповой УРТ.

### Материалы и методы

Исследование проводилось на примере двух котельных АО «МЭК». Котельная «Центральная» включает 4 котла, котельная «Химмаш» – 3 котла. В процессе работы использовались общенаучные методы, а также методы линейного программирования.

### Результаты исследования

Чтобы выявить зависимость влияния порядка работы котлоагрегатов на их групповой УРТ, были составлены алгоритм и программа. Данная задача решается методом линейного программирования<sup>6</sup> [3–5]. Алгоритм нахождения оптимального группового УРТ представлен последовательностью шагов, приведенных ниже.

1. Составляется комбинация  $i$ -х котлоагрегатов в  $j$ -х режимах их нагрузки для обеспечения нагрузки ко-

тельной, соответствующей  $k$ -й температуре наружного воздуха:

$$\sum_{i=1}^N Q_i K_i = \bar{Q}_j. \quad (1)$$

2. Записывается целевая функция и проверяются на экстремум (минимум, максимум, среднее значение); на ее основе вычисляются комбинации  $i$ -х котлоагрегатов в  $j$ -х режимах их нагрузки для обеспечения нагрузки котельной (при  $k$ -й температуре наружного воздуха), соответствующие минимальному потреблению топлива:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Q_{ij} K_{ij} b_{ij} \rightarrow \min. \quad (2)$$

3. Для найденных комбинаций вычисляется групповой УРТ:

$$\bar{b}_j = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{ij} b_{ij}}{\sum_{i=1}^N Q_{ij}}. \quad (3)$$

Данный алгоритм реализован на примере двух котельных г. Рузаевка («Центральная» и «Химмаш»). В табл. 1 приведены результаты расчета УРТ по режимным картам. В отдельных колонках приведены минимальный, максимальный и средний УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Центральная» в зависимости от температуры наружного воздуха.

<sup>4</sup> Равич М. Б. Топливо и эффективность его использования. М. : Наука, 1971. 358 с. URL: <http://www.teplota.org.ua/2010-03-06-ravich-m-b-toplivo-i-effektivnost-ego-ispolzovaniya.html>

<sup>5</sup> РД 1.19-126-2004 «Методика расчета удельных норм расхода газа на выработку тепловой энергии и расчета потерь в системах теплоснабжения (котельные и тепловые сети)» предполагает определение индивидуальных и групповых норм. URL: [http://www.infosait.ru/norma\\_doc/46/46503](http://www.infosait.ru/norma_doc/46/46503)

<sup>6</sup> Палий И. А. Линейное программирование : учеб. пособие. М. : Эксмо, 2008. 256 с.



Таблица 1

Table 1

**Результаты расчета удельного расхода топлива по режимным картам  
(котельная «Центральная»)**

**Results of calculation of specific fuel consumption on regime maps (Tsentrlnaya boiler compartment)**

| Температура<br>наружного<br>воздуха, °С /<br>Outside air<br>tempera-<br>ture, °С | Нагрузка<br>по ко-<br>тельной,<br>Гкал/ч /<br>Load of<br>the boiler,<br>Gcal/h | Режимы работы<br>котлов / Boiler<br>operation modes |     |     |     | Минималь-<br>ный УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Minimal<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal | Максималь-<br>ный УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Maximal<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal | Средний<br>УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Средний<br>Average<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal |
|--|--|---|-----|-----|-----|---|--|--|
| 1  | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8  | 9  |
| 8  | 4,45175  | 1.3   | 2.4 | 0   | 0   | 167,6798  | 179,1290   | 172,9011   |
| 7  | 4,89693  | 1.3   | 2.4 | 0   | 0   | 167,6798  | 179,1290   | 172,9045   |
| 6  | 5,34211  | 1.3   | 2.4 | 0   | 0   | 167,6798  | 179,1290   | 172,9005   |
| 5  | 5,78728  | 1.3   | 2.4 | 0   | 0   | 167,6798  | 179,1290   | 172,9027   |
| 4  | 6,23246  | 1.3   | 2.4 | 0   | 0   | 167,6798  | 179,1290   | 172,8811   |
| 3  | 6,67763  | 1.3   | 2.4 | 0   | 0   | 167,6798  | 178,4129   | 172,8799   |
| 2  | 7,12281  | 1.3   | 2.3 | 0   | 0   | 167,8657  | 177,8422   | 172,8701   |
| 1  | 7,56798  | 1.3   | 2.1 | 0   | 0   | 168,0879  | 177,8422   | 172,8716   |
| 0  | 8,01316  | 1.4   | 2.1 | 0   | 0   | 168,4317  | 177,8422   | 172,8799   |
| -1   | 8,45833  | 1.3   | 2.4 | 3.1 | 0   | 169,2553  | 175,7872   | 172,8799   |
| -2   | 8,90351  | 1.3   | 2.4 | 3.1 | 0   | 169,2553  | 175,7872   | 172,8740   |
| -3   | 9,34868  | 1.3   | 2.4 | 3.1 | 0   | 169,2553  | 175,6838   | 172,8588   |
| -4   | 9,79386  | 1.3   | 2.4 | 3.3 | 0   | 169,2981  | 175,6838   | 172,8447   |
| -5   | 10,23903   | 1.3   | 2.4 | 3.3 | 0   | 169,2981  | 175,3842   | 172,8371   |
| -6   | 10,68421   | 1.3   | 2.3 | 3.3 | 0   | 169,3456  | 175,2618   | 172,8495   |
| -7   | 11,12939   | 1.3   | 2.1 | 3.3 | 0   | 169,4446  | 175,2618   | 172,8492   |
| -8   | 11,57456   | 1.3   | 2.2 | 3.3 | 0   | 169,5969  | 174,9900   | 172,8843   |
| -9   | 12,01974   | 1.4   | 2.2 | 3.3 | 0   | 169,7756  | 174,9543   | 172,9057   |
| -10  | 12,46491   | 1.4   | 2.2 | 3.4 | 0   | 170,1730  | 174,5182   | 172,9062   |
| -11  | 12,91009   | 1.3   | 2.3 | 3.3 | 4.1 | 171,8593  | 174,5182   | 172,9152   |
| -12  | 13,35526   | 1.3   | 2.3 | 3.3 | 4.1 | 171,8593  | 173,7816   | 172,9222   |
| -13  | 13,80044   | 1.3   | 2.1 | 3.3 | 4.1 | 171,8708  | 173,7816   | 172,9345   |
| -14  | 14,24561   | 1.4   | 2.1 | 3.3 | 4.1 | 171,9590  | 173,6591   | 172,9485   |

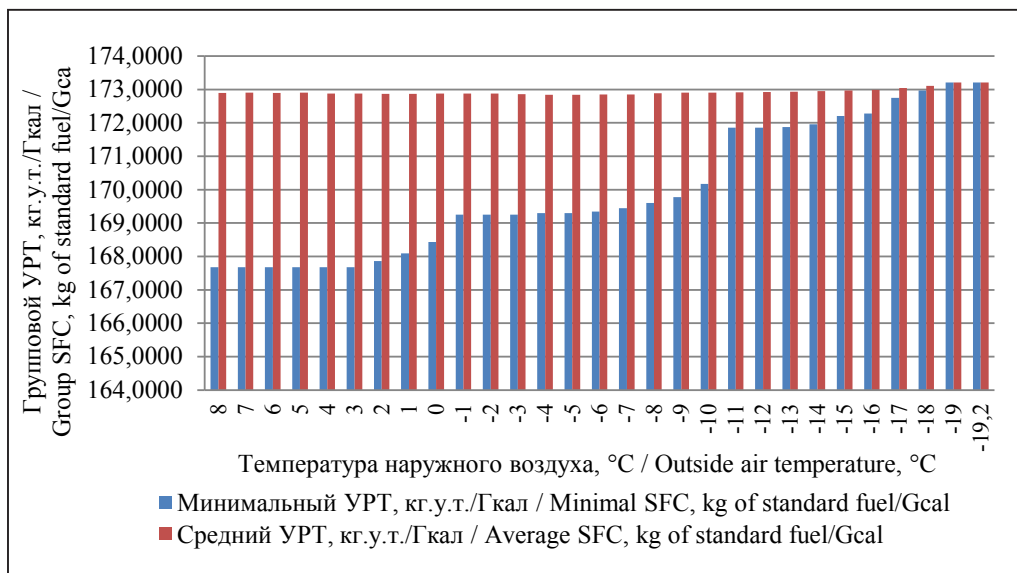
Окончание табл. 1 / End of table 1

| 1     | 2        | 3   | 4   | 5   | 6   | 7        | 8        | 9        |
|-------|----------|-----|-----|-----|-----|----------|----------|----------|
| -15   | 14,69079 | 1.3 | 2.2 | 3.4 | 4.1 | 172,2089 | 173,6532 | 172,9694 |
| -16   | 15,13596 | 1.4 | 2.2 | 3.4 | 4.1 | 172,2833 | 173,6532 | 172,9920 |
| -17   | 15,58114 | 1.4 | 2.2 | 3.3 | 4.3 | 172,7535 | 173,4764 | 173,0449 |
| -18   | 16,02632 | 1.4 | 2.2 | 3.4 | 4.3 | 172,9711 | 173,2111 | 173,1060 |
| -19   | 16,47149 | 1.4 | 2.2 | 3.4 | 4.4 | 173,2111 | 173,2111 | 173,2111 |
| -19,2 | 16,56053 | 1.4 | 2.2 | 3.4 | 4.4 | 173,2111 | 173,2111 | 173,2111 |

Для наглядности изменение значений УРТ приведено на рис. 1. Как видно из данного рисунка, минимальное значение УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Центральная» по режимным картам в зависимости от режимов работы котлоагрегатов и нагрузки меняется от 167,68 до 173,21 кг.у.т./Гкал. Максимальное значение УРТ на малых режимах может достигать 179,13 кг.у.т./Гкал. Разница между минимальным и максимальным УРТ составляет 6,8 %. Фактический

УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Центральная» существенно отличается от результатов режимной наладки из-за объективных причин, главной из которых является грубая настройка режимов горения при ручном управлении.

В табл. 2 приведены результаты расчета оптимизированных фактических значений УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Центральная» (минимальный, максимальный и средний УРТ).



Р и с. 1. Изменение минимального и среднего УРТ по режимным картам от котельной «Центральная» в зависимости от температуры наружного воздуха

Fig. 1. Change the minimum and the average of SFC on regime maps from the Tsentralnaya boiler depending on the outside temperature



Таблица 2

Table 2

## Результаты расчета фактического удельного расхода топлива (котельная «Центральная»)

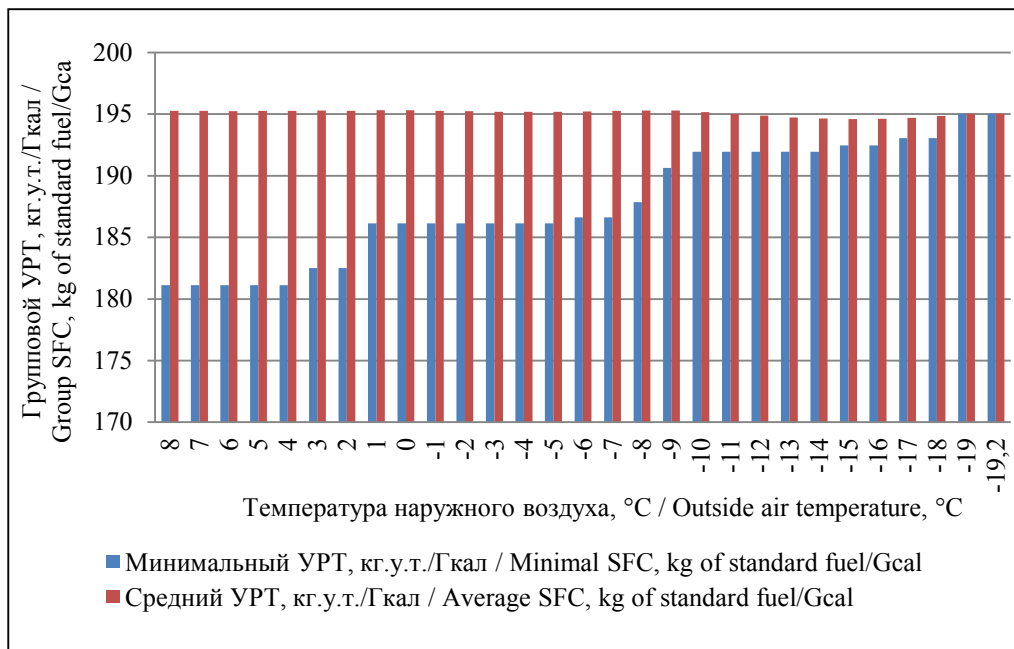
## Results of the calculation of actual specific fuel consumption (Tsentrlnaya boiler compartment)

| Температура<br>наружного<br>воздуха, °C /<br>Outside air<br>tempera-<br>ture, °C | Нагрузка по<br>котельной,<br>Гкал/ч /<br>Load of the<br>boiler,<br>Gcal/h | Режимы работы<br>котлов / Boiler<br>operation modes |     |     |     | Минималь-<br>ный УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Minimal<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal | Максималь-<br>ный УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Maximal<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal | Средний<br>УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Average<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal |
|--|---|---|-----|-----|-----|---|--|---|
| 8  | 4,45175   | 0   | 2.4 | 0   | 4.4 | 181,1323  | 214,8735   | 195,2716  |
| 7  | 4,89693   | 0   | 2.4 | 0   | 4.4 | 181,1323  | 214,8735   | 195,2778  |
| 6  | 5,34211   | 0   | 2.4 | 0   | 4.4 | 181,1323  | 211,3360   | 195,2475  |
| 5  | 5,78728   | 0   | 2.4 | 0   | 4.4 | 181,1323  | 211,1693   | 195,2696  |
| 4  | 6,23246   | 0   | 2.4 | 0   | 4.4 | 181,1323  | 211,1693   | 195,2655  |
| 3  | 6,67763   | 0   | 2.1 | 0   | 4.4 | 182,5036  | 209,3977   | 195,2946  |
| 2  | 7,12281   | 0   | 2.1 | 0   | 4.4 | 182,5036  | 208,4015   | 195,2791  |
| 1  | 7,56798   | 1.2   | 2.4 | 0   | 4.4 | 186,1435  | 208,4015   | 195,3301  |
| 0  | 8,01316   | 1.2   | 2.4 | 0   | 4.4 | 186,1435  | 208,4015   | 195,3301  |
| -1   | 8,45833   | 1.2   | 2.4 | 0   | 4.4 | 186,1435  | 206,7927   | 195,2672  |
| -2   | 8,90351   | 1.2   | 2.4 | 0   | 4.4 | 186,1435  | 206,7927   | 195,2337  |
| -3   | 9,34868   | 1.2   | 2.4 | 0   | 4.4 | 186,1435  | 206,7927   | 195,1996  |
| -4   | 9,79386   | 1.2   | 2.4 | 0   | 4.4 | 186,1435  | 205,7910   | 195,1880  |
| -5   | 10,23903  | 1.2   | 2.4 | 0   | 4.4 | 186,1435  | 205,4820   | 195,1918  |
| -6   | 10,68421  | 1.2   | 2.1 | 0   | 4.4 | 186,6292  | 204,6638   | 195,2097  |
| -7   | 11,12939  | 1.2   | 2.1 | 0   | 4.4 | 186,6292  | 203,8489   | 195,2794  |
| -8   | 11,57456  | 1.4   | 2.1 | 0   | 4.4 | 187,8553  | 201,5441   | 195,2847  |
| -9   | 12,01974  | 1.4   | 2.2 | 0   | 4.4 | 190,6369  | 201,5441   | 195,2856  |
| -10  | 12,46491  | 1.2   | 2.4 | 3.2 | 4.4 | 191,9474  | 200,9447   | 195,1592  |
| -11  | 12,91009  | 1.2   | 2.4 | 3.2 | 4.4 | 191,9474  | 200,9447   | 194,9979  |
| -12  | 13,35526  | 1.2   | 2.4 | 3.2 | 4.4 | 191,9474  | 200,4480   | 194,8782  |
| -13  | 13,80044  | 1.2   | 2.1 | 3.2 | 4.4 | 191,9614  | 200,4165   | 194,7183  |
| -14  | 14,24561  | 1.2   | 2.1 | 3.2 | 4.4 | 191,9614  | 199,9728   | 194,6416  |
| -15  | 14,69079  | 1.2   | 2.1 | 3.4 | 4.4 | 192,4670  | 199,9728   | 194,6014  |
| -16  | 15,13596  | 1.2   | 2.1 | 3.4 | 4.4 | 192,4670  | 199,4763   | 194,6274  |
| -17  | 15,58114  | 1.4   | 2.1 | 3.4 | 4.4 | 193,0668  | 195,9493   | 194,7025  |
| -18  | 16,02632  | 1.4   | 2.1 | 3.4 | 4.4 | 193,0668  | 195,5840   | 194,8659  |
| -19  | 16,47149  | 1.4   | 2.2 | 3.4 | 4.4 | 195,0326  | 195,0326   | 195,0326  |
| -19,2  | 16,56053  | 1.4   | 2.2 | 3.4 | 4.4 | 195,0326  | 195,0326   | 195,0326  |



Как видно из данной таблицы, минимальный УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Центральная» изменяется от 181,13 до 195,03 кг.у.т./Гкал. Максимальное значение УРТ на малых режимах составляет 214,87 кг.у.т./Гкал,

что на 18,74 % превышает минимальный УРТ. По отношению к среднему режиму в оптимальном режиме УРТ меньше на 7,8 %. Для наглядности применение минимального и среднего УРТ приведено на рис. 2.



Р и с. 2. Изменение фактического минимального и среднего УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Центральная» в зависимости от температуры наружного воздуха

F i g. 2. Change the actual minimum and average SFC for the production of thermal energy from boiler-house "Central" depending on the outside temperature

Аналогично в табл. 3 и 4 приведены результаты расчетов УРТ на выработку тепловой энергии в котельной «Хим-маш» по режимным картам и фак-

тическим замерам соответственно (расход теплоносителя через котлы, перепады температур при изменении нагрузки).





Результаты расчета удельного расхода топлива по режимным картам (котельная «Химмаш»)

Results of calculation of specific fuel consumption on regime maps (Khimmach boiler compartment)

| Температура<br>наружного<br>воздуха, °C /<br>Outside air<br>tempera-<br>ture, °C | Нагрузка по<br>котельной,<br>Гкал/ч /<br>Load of the<br>boiler, Gcal/h | Режимы рабо-<br>ты котлов /<br>Boiler<br>operation<br>modes |     |     | Минималь-<br>ный УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Minimal<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal | Максималь-<br>ный УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Maximal<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal | Средний<br>УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Average<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal |
|--|--|---|-----|-----|---|--|---|
| 1  | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7  | 8   |
| 8  | 3,09042  | 1.2   | 0   | 0   | 160,6600  | 164,3445   | 162,7689  |
| 7  | 3,39946  | 1.3   | 0   | 0   | 160,9200  | 164,3445   | 162,7868  |
| 6  | 3,7085   | 1.3   | 0   | 0   | 160,9200  | 164,3445   | 162,7868  |
| 5  | 4,01754  | 1.1   | 0   | 3.4 | 160,9584  | 164,3445   | 162,8157  |
| 4  | 4,32658  | 1.1   | 0   | 3.4 | 160,9584  | 164,3445   | 162,8157  |
| 3  | 4,63563  | 1.1   | 0   | 3.4 | 160,9584  | 164,3445   | 162,8301  |
| 2  | 4,94467  | 1.1   | 0   | 3.4 | 160,9584  | 164,3445   | 162,8297  |
| 1  | 5,25371  | 1.1   | 0   | 3.4 | 160,9584  | 164,3445   | 162,8308  |
| 0  | 5,56275  | 1.1   | 0   | 3.4 | 160,9584  | 164,3445   | 162,8255  |
| -1   | 5,87179  | 1.1   | 0   | 3.4 | 160,9584  | 164,3445   | 162,8170  |
| -2   | 6,18083  | 1.1   | 0   | 3.4 | 160,9584  | 164,3445   | 162,8160  |
| -3   | 6,48988  | 1.1   | 0   | 3.4 | 160,9584  | 164,3445   | 162,8159  |
| -4   | 6,79892  | 1.2   | 0   | 3.4 | 161,0076  | 164,3445   | 162,8274  |
| -5   | 7,10796  | 1.3   | 0   | 3.4 | 161,1076  | 164,3445   | 162,8229  |
| -6   | 7,41700  | 1.3   | 0   | 3.4 | 161,1076  | 164,3325   | 162,8062  |
| -7   | 7,72604  | 1.4   | 0   | 3.4 | 161,2240  | 164,2672   | 162,7928  |
| -8   | 8,03508  | 1.4   | 0   | 3.4 | 161,2240  | 164,2672   | 162,7719  |
| -9   | 8,34413  | 1.3   | 0   | 3.1 | 161,9501  | 164,1576   | 162,7947  |
| -10  | 8,65317  | 1.3   | 0   | 3.1 | 161,9501  | 164,1576   | 162,7937  |
| -11  | 8,96221  | 1.4   | 0   | 3.1 | 161,9978  | 163,3338   | 162,7994  |
| -12  | 9,27125  | 1.4   | 0   | 3.1 | 161,9978  | 163,3338   | 162,8257  |
| -13  | 9,580291667  | 1.4   | 2.1 | 3.4 | 162,140109  | 163,3338366  | 162,857077  |
| -14  | 9,889333333  | 1.4   | 2.1 | 3.4 | 162,140109  | 163,3338366  | 162,90194   |
| -15  | 10,198375  | 1.4   | 2.2 | 3.4 | 162,2089271   | 163,3338366  | 162,926405  |
| -16  | 10,50741667  | 1.3   | 2.4 | 3.4 | 162,2253403   | 163,327707   | 162,953634  |
| -17  | 10,81645833  | 1.4   | 2.4 | 3.4 | 162,249776  | 163,327707   | 162,974024  |
| -18  | 11,1255  | 1.4   | 2.4 | 3.4 | 162,249776  | 163,2824555  | 162,978648  |
| -19  | 11,43454167  | 1.4   | 2.4 | 3.1 | 162,741858  | 163,2168815  | 163,011797  |

Окончание табл. 3 / End of table 3

| 1     | 2           | 3   | 4   | 5   | 6           | 7           | 8          |
|-------|-------------|-----|-----|-----|-------------|-------------|------------|
| -20   | 11,74358333 | 1.4 | 2.4 | 3.1 | 162,741858  | 163,2168815 | 163,021171 |
| -21   | 12,052625   | 1.4 | 2.4 | 3.1 | 162,741858  | 163,1908746 | 163,052606 |
| -22   | 12,36166667 | 1.4 | 2.4 | 3.1 | 162,741858  | 163,1660617 | 163,023887 |
| -23   | 12,67070833 | 1.4 | 2.4 | 3.2 | 162,9600311 | 163,1660617 | 163,086253 |
| -24   | 12,97975    | 1.4 | 2.4 | 3.3 | 163,132666  | 163,132666  | 163,132666 |
| -24,5 | 13,13427083 | 1.4 | 2.4 | 3.3 | 163,132666  | 163,132666  | 163,13267  |

Таблица 4

Table 4

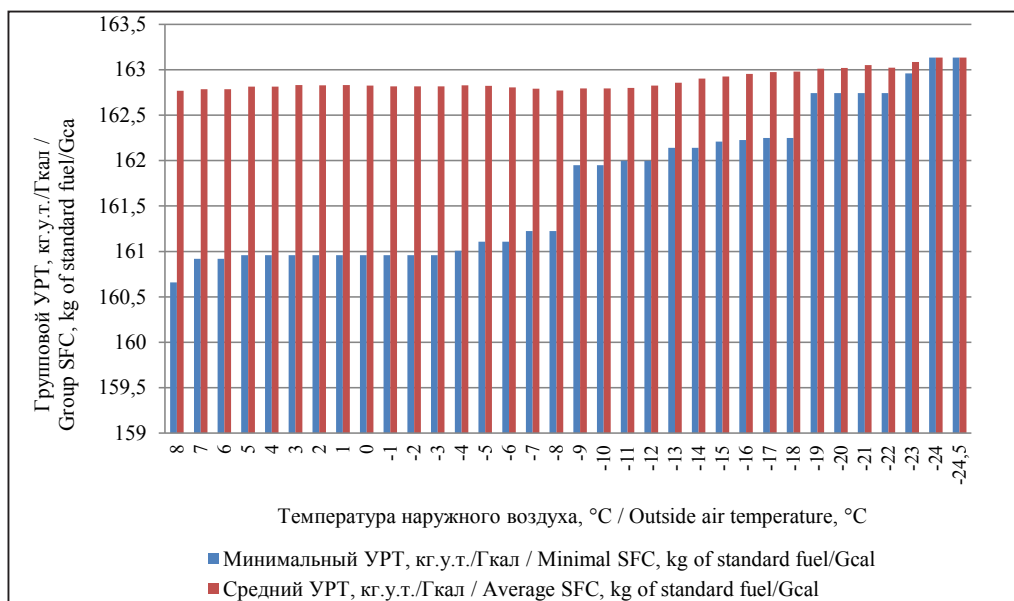
**Результаты расчета фактического удельного расхода топлива (котельная «Химмаш»)**  
**Results of the calculation of actual specific fuel consumption (Khim mash boiler compartment)**

| Температура<br>наружного<br>воздуха, °C /<br>Outside air<br>temperature, °C | Нагрузка по<br>котельной,<br>Гкал/ч /<br>Load of the<br>boiler, Gcal/h | Режимы рабо-<br>ты котлов /<br>Boiler<br>operation<br>modes |   |     | Минималь-<br>ный УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Minimal<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal | Максималь-<br>ный УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Maximal<br>SFC, kg of<br>standard<br>fuel/Gcal | Средний<br>УРТ,<br>кг.у.т./Гкал /<br>Average<br>SFC, kg of<br>standard |
|---|--|---|---|-----|---|--|--|
| 1   | 2  | 3   | 4 | 5   | 6   | 7  | 8  |
| 8   | 3,09042  | 1.4   | 0 | 0   | 176,0466  | 200,3769   | 187,0022   |
| 7   | 3,39946  | 1.4   | 0 | 0   | 176,0466  | 200,3769   | 187,0298   |
| 6   | 3,7085   | 1.4   | 0 | 0   | 176,0466  | 200,3769   | 187,0298   |
| 5   | 4,01754  | 1.4   | 0 | 0   | 176,0466  | 200,3769   | 187,1223   |
| 4   | 4,32658  | 1.4   | 0 | 0   | 176,0466  | 200,3769   | 187,1223   |
| 3   | 4,63563  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 194,3930   | 187,1032   |
| 2   | 4,94467  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 194,3006   | 187,0953   |
| 1   | 5,25371  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 194,3006   | 187,0349   |
| 0   | 5,56275  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 194,3006   | 186,9552   |
| -1  | 5,87179  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 194,3006   | 186,7895   |
| -2  | 6,18083  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 194,3006   | 186,7870   |
| -3  | 6,48988  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 194,3006   | 186,7641   |
| -4  | 6,79892  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 194,3006   | 186,7988   |
| -5  | 7,10796  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 193,9438   | 186,7491   |
| -6  | 7,41700  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 193,9121   | 186,7214   |
| -7  | 7,72604  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 193,9121   | 186,7744   |
| -8  | 8,03508  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 193,9121   | 186,7075   |
| -9  | 8,34413  | 1.4   | 0 | 3.1 | 178,4682  | 193,9121   | 186,7021   |



Окончание табл. 4 / End of table 4

| 1     | 2        | 3   | 4   | 5   | 6        | 7        | 8        |
|-------|----------|-----|-----|-----|----------|----------|----------|
| -10   | 8,65317  | 1.4 | 0   | 3.1 | 178,4682 | 193,9121 | 186,6009 |
| -11   | 8,96221  | 1.4 | 0   | 3.1 | 178,4682 | 193,9121 | 186,5967 |
| -12   | 9,27125  | 1.4 | 0   | 3.1 | 178,4682 | 193,9121 | 186,5865 |
| -13   | 9,58029  | 1.4 | 2.3 | 3.1 | 181,4506 | 193,9121 | 186,6873 |
| -14   | 9,88933  | 1.4 | 2.3 | 3.1 | 181,4506 | 193,6625 | 186,5783 |
| -15   | 10,19838 | 1.4 | 2.3 | 3.1 | 181,4506 | 191,1591 | 186,4192 |
| -16   | 10,50742 | 1.4 | 2.3 | 3.1 | 181,4506 | 191,1591 | 186,3483 |
| -17   | 10,81646 | 1.4 | 2.3 | 3.1 | 181,4506 | 191,1591 | 186,1046 |
| -18   | 11,12550 | 1.4 | 2.3 | 3.1 | 181,4506 | 191,0092 | 185,7314 |
| -19   | 11,43454 | 1.4 | 2.3 | 3.1 | 181,4506 | 188,7087 | 185,5094 |
| -20   | 11,74358 | 1.4 | 2.3 | 3.1 | 181,4506 | 188,6257 | 185,3532 |
| -21   | 12,05263 | 1.4 | 2.4 | 3.1 | 182,4023 | 186,9499 | 185,3346 |
| -22   | 12,36167 | 1.4 | 2.4 | 3.1 | 182,4023 | 186,9127 | 184,9584 |
| -23   | 12,67071 | 1.4 | 2.3 | 3.3 | 184,7183 | 185,5086 | 185,2441 |
| -24   | 12,97975 | 1.4 | 2.4 | 3.3 | 185,5053 | 185,5053 | 185,5053 |
| -24,5 | 13,13427 | 1.4 | 2.4 | 3.3 | 185,5053 | 185,5053 | 185,5053 |

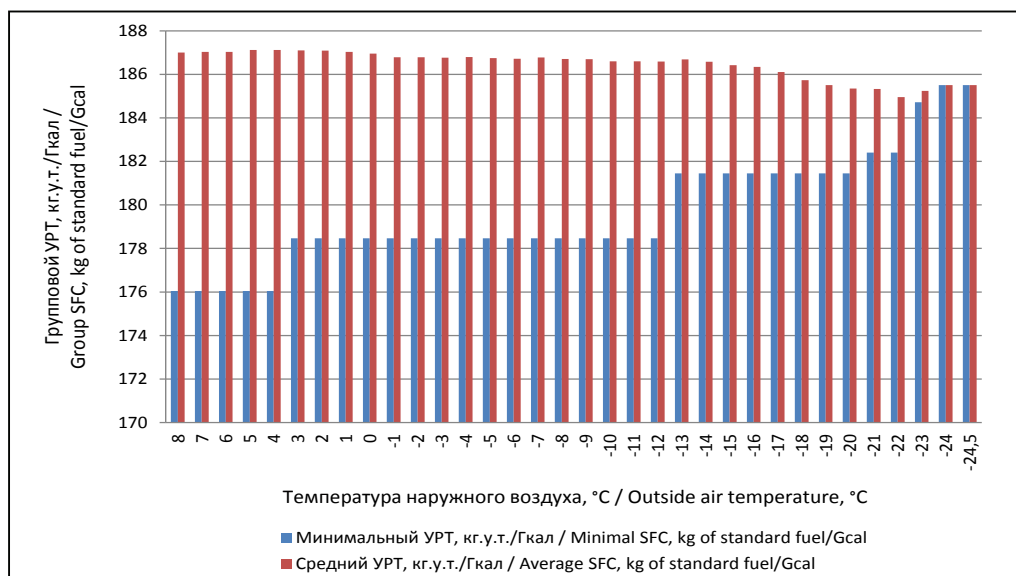


Р и с. 3. Изменение минимального и среднего УРТ по режимным картам от котельной «Химмаш» в зависимости от температуры наружного воздуха

F i g. 3. Change of the minimum and the average SFC on regime maps of Khimmash boiler compartment depending on the outside temperature

Как видно из табл. 3 минимальное (оптимальное) значение УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Химмаш» составляет 160,66 кг.у.т./Гкал, максимальное – 164,34 кг.у.т./Гкал на малых режимах. Разница между УРТ составляет 2,29 %. Для наглядности изменение минимального и среднего УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Химмаш» приведены на рис. 3 в зависимости от температуры наружного воздуха.

Изменение фактического УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Химмаш» в результате ее испытаний по прямому балансу между минимальным и максимальным значениями в режиме малых нагрузок составило 13,8 %. Срезка температурного графика происходит на  $-24,5^{\circ}\text{C}$ , что также не достигает  $-30^{\circ}\text{C}$ . Для наглядности на рис. 4 приведено изменение минимального и среднего значений УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Химмаш».



Р и с. 4. Изменение фактического минимального и среднего УРТ на выработку тепловой энергии от котельной «Химмаш» в зависимости от температуры наружного воздуха

F i g. 4. Change of the actual minimum and average SFC for thermal energy from Khimmash boiler compartment depending on the outside temperature

Из данного рисунка видно, что существенное отклонение между ними наблюдается до температуры наружного воздуха, равного  $-12^{\circ}\text{C}$ .

### Обсуждение и заключения

1. Практика энергетических обследований теплосетевых компаний в системах коммунального теплоснабжения показала, что более половины котлоагрегатов работает в ручном режиме [6–8]. Групповой фактический УРТ на выработку (отпуск) тепловой энергии

от котельной отличается от расчетного, утвержденного в тарифе, на 20 % и более [9–11]. Одним из эффективных и малозатратных мероприятий по снижению УРТ на отпуск тепловой энергии от котельной является повышение точности соблюдения режимов горения и порядка работы котлоагрегатов. Последнее достигается за счет разработки режимных карт для котельных, которые можно составить по результатам технологического аудита котельных.



2. Задача определения оптимального порядка работы котлоагрегатов с различными индивидуальными УРТ на выработку тепловой энергии от котельной решается методом линейного программирования. В статье предложен алгоритм нахождения оптимального группового УРТ на выработку тепловой энергии от котельной в зависимости от температуры наружного воздуха.

3. Для котельной «Центральная» разница между минимальным и мак-

симальным УРТ составляет 6,8 % по режимным картам, а по факту 17,74 %. Для котельной «Химмаш» разница между минимальным и максимальным УРТ составляет 2,29 %, а по факту – 13,8%.

4. Режимные карты для котельных «Центральная» и «Химмаш» были внедрены на предприятии АО «МЭК», что позволило в режимах малых и средних нагрузок (до -10 °С) снизить потребление газа до 10 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Левцев А. П., Кручинкина О. А., Ениватов А. В. Экспресс-оценка эффективности функционирования систем централизованного теплоснабжения // Вестник НИИ гуманитарных наук при Правительстве Республики Мордовия. 2015. Т. 33, № 1. С. 79–88. URL: <https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKewjpppKqyfTWAhUHQZoKNaxQCKsQFggpMAE&url=https%3A%2F%2Fcyberleninka.ru%2Farticle%2Fn%2Fproblemy-energobezrezheniya-regiona-i-puti-ih-resheniya.pdf&usq=AOvVaw2-ij9dKxnwhwCih1F3LAVE>

2. Кручинкина О. А., Мельникова М. Б. Методика определения фактических удельных расходов топлива котлоагрегатов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : межвуз. сб. науч. тр. Саранск, 2013. С. 267–269.

3. Левцев А. П., Макеев А. Н., Макеев С. Н. Анализ причин снижения эффективности теплопередачи в системе традиционного теплоснабжения // Актуальные проблемы современной науки: свежий взгляд и новые подходы : сб. мат-лов I Междунар. науч.-практ. конф. Йошкар-Ола : Приволжский научно-исследовательский центр, 2012. С. 36–39.

4. Опыт регулирования теплопотребления путем модернизации индивидуального теплового пункта / Т. И. Королева [и др.] // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 2. С. 109–114.

5. Макеев А. Н., Левцев А. П. Импульсные системы теплоснабжения общественных зданий // Региональная архитектура и строительство. 2010. № 2. С. 108–114. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15322273>

6. Энергосберегающие мероприятия в системах отопления общественных зданий / Т. И. Королева [и др.] // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 2. С. 154–158.

7. Левцев А. П., Макеев А. Н., Лазарев А. А. Моделирование теплопередачи в импульсной системе теплоснабжения // Омский научный вестник. 2012. Т. 107, № 1. С. 216–217. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-teploperedachi-v-impulsnoy-sisteme-teplosnabzheniya>

8. Левцев А. П., Кручинкина О. А. Проблемы энергосбережения региона и пути их решения // Регионология. 2014. Т. 86, № 1. С. 66–72. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-energobezrezheniya-regiona-i-puti-ih-resheniya>

9. Автоматизированная система регистрации показателей теплопотребления и регулирования подачи теплоносителя в учебном заведении / А. П. Левцев [и др.] // Энергоресурсосберегающие технологии и системы в АПК : межвуз. сб. науч. тр. Саранск, 2003. С. 32–36.

10. Левцев А. П., Кручинкина О. А. Методика определения фактических теплопотерь и термических сопротивлений на отдельных участках теплосети // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : межвуз. сб. науч. тр. Саранск, 2013. С. 263–267.

11. Левцев А. П., Макеев А. Н., Макеев С. Н. К вопросу повышения энергетической эффективности теплоиспользующих установок // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 55-летию Института механики и энергетики. Саранск, 2012. С. 269–271.

Поступила 27.07.2017; принята к публикации 18.10.2017; опубликована онлайн 19.12.2017

Об авторах:

**Левцев Алексей Павлович**, заведующий кафедрой теплоэнергетических систем, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), доктор технических наук, профессор, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3205-2396>**, [levtzevap@mail.ru](mailto:levtzevap@mail.ru)

**Кручинкина Ольга Алексеевна**, магистрантка кафедры теплоэнергетических систем, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева» (Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3205-2396>**, [levkrul@gmail.com](mailto:levkrul@gmail.com)

**Юаньюань Ши**, магистрантка по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), Университет Дзянсу, (г. Чжэньцзян, КНР), **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3205-2396>**, [shiyuanyuan0908@163.com](mailto:shiyuanyuan0908@163.com)

Вклад соавторов:

А. П. Левцев: научное руководство, анализ и доработка текста; О. А. Кручинкина: подготовка начального текста с последующей доработкой, анализ литературных данных; Ши Юаньюань: подготовка и первичный анализ литературных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## REFERENCES

1. Levtshev A. P., Kruchinkina O. A., Enivatov A. V. Rapid evaluation of the efficiency of district heating systems. *Vestnik NII humanitarnykh nauk pri Pravительstve Respubliki Mordoviya* = Bulletin of Research Institute of Humanities at Government of Republic of Mordovia. 2015; 1(33): 79–88. Available at: <https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKewjpppKqyfTWAhUhQZoKHaxQCKsQFggpMAE&url=https%3A%2F%2Fcyberleninka.ru%2Farticle%2Fproblem-energoberezheniya-regiona-i-puti-ih-resheniya.pdf&usg=AOvVaw2-ij9dKxnwhwCih1F3LAVE> (In Russ.)
2. Kruchinkina O. A., Melnikova M. B. Method of determining the actual specific fuel consumption of the boilers. In: *Energy and resource saving technologies and systems: Proceedings*. Saransk: Mordovia University Publ.; 2013; 267–269. (In Russ.)
3. Levtshev A. P., Makeev, A. N., Makeev S. N. Analysis of the causes of reduced efficiency of heat transfer in the system of traditional heat supply. In: *Actual problems of modern science: A fresh look and new approaches: Proceedings*. Yoshkar-Ola: Volga Research Center, 2012; 36–39. (In Russ.)
4. Koroleva T. I., Salmin V. V., Ezhov E. G., Ivashchenko N. Yu. Experience of regulation of heat consumption by modernization of individual heat point. *Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo* = Regional Architecture and Construction. 2013; 2:109–114. (In Russ.)
5. Makeyev A. N., Levtshev A. P., Pulse systems of a heat supply of public buildings. *Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo* = Regional Architecture and Construction. 2010; 2:108–114. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15322273>
6. Koroleva T. I., Kuzmicky A. A., Vasin M. E., Ezhov E. G., Levtshev A. P. Energy saving measures in heating systems of public buildings. *Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo* = Regional Architecture and Construction. 2012; 2:154–158.
7. Levtshev A. P., Makeyev, A. N., Lazarev, A. A., Heat transfer modeling in pulse system of heat supply. *Omskiy nauchnyy vestnik* = Omsk Scientific Bulletin. 2012; 1(107):216–217. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-teploperedachi-v-impulsnoy-sisteme-teplosnabzheniya>
8. Levtshev A. P., Kruchinkina O. A. Problems of energy saving and ways of their solution. *Regionologiya* = Regional Studies. 2014; 1(86):66–72. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/problem-energoberezheniya-regiona-i-puti-ih-resheniya>



9. Levtshev A. P., Keleinikova S. A., Meandrov K. A. The automated system of registration of indicators of heat consumption and regulation of the heat supply in school. In: Levtshev A. P., editors. Energy resource saving technologies and systems in agriculture interuniversity collection of scientific works. Saransk; 2003; 32–36. (In Russ.)

10. Levtshev A. P., Kruchinkina O. A. Methods of determining the actual heat losses and thermal resistances of separate sites of a heating system. In: Energy and resource saving technologies and systems: Proceedings. Saransk: Mordovia University Publ.; 2013; 263–267.

11. Levtshev A. P., Makeyev A. N., Makeyev S. N. On issue of energy efficiency installations. In: Energy-saving technologies and systems: Proceedings. Saransk: Mordovia University Publ.; 2012; 269–271.

*Submitted 27.07.2017; revised 18.10.2017; published online 19.12.2017*

*About the authors:*

**Aleksey P. Levtshev**, Head of Heat and Power Systems Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevitskaya St., Saransk 640005, Russia), Dr.Sci. (Engineering), Professor, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3205-2396>**, [levtzevap@mail.ru](mailto:levtzevap@mail.ru)

**Olga A. Kruchinkina**, Master's Degree Student, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevitskaya St., Saransk 640005, Russia), **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3205-2396>**, [levkruol@gmail.com](mailto:levkruol@gmail.com)

**Shi Yuan Yuan**, Master's Degree Student, Jiangsu University (Road Zhenjiang, Jiangsu, China), **ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-3205-2396>**, [shiyuanyuan0908@163.com](mailto:shiyuanyuan0908@163.com)

*Contribution of the co-authors:*

A. P. Levtshev: scientific supervision, analysis and revision of the draft; O. A. Kruchinkina: writing the draft, reviewing and analyzing the literature; Shi Yuan Yuan: analyzing the literature.

*All authors have read and approved the final version of the manuscript.*