

Д. А. ЕДУКОВ
О. Г. САЙМАНОВА
В. А. ЕДУКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА С ВТОРИЧНЫМ ОХЛАЖДАЮЩИМ КОНТУРОМ

ENERGY EFFICIENCY STUDY OF THE SYSTEM
AIR CONDITIONING WITH SECONDARY COOLING CIRCUIT

В статье приведены результаты многофакторного исследования энергоэффективности системы кондиционирования воздуха чиллер-фанкойл с вторичным охлаждающим контуром, установленной в здании гостиницы около прибрежной зоны. Приводится описание конструкции исследуемой установки. В результате исследования влияния изменения температуры морской воды и ступеней холодопроизводительности на энергоэффективность системы кондиционирования получены поверхности отклика и уравнения регрессии, позволяющие спрогнозировать энергопотребление в течение периода эксплуатации.

Ключевые слова: конденсатор, энергоэффективность, охладитель жидкости, теплообменник, кондиционирование, чиллер, прибрежная зона, вторичный охлаждающий контур

The article presents the results of a multivariate study of the energy efficiency of the chiller-fan coil air conditioning system with a secondary cooling circuit installed in a hotel building near the coastal zone. A description of the design of the investigated installation is given. As a result of studying the effect of changing sea water temperature and cooling capacity steps on the energy efficiency of the air conditioning system, response surfaces and regression equations have been obtained that allow predicting energy consumption during the operation period.

Keywords: capacitor, energy efficiency, liquid cooler, heat exchanger, air conditioning, chiller, coastal zone, secondary cooling circuit

Введение

В настоящее время наиболее актуальной проблемой является снижение глобального потепления. Поэтому в ряде стран принимаются на законодательном уровне специальные меры и ограничения, позволяющие сдерживать увеличение температуры климатической системы Земли в пределах 1,5 град. Одним из главных факторов, влияющих на глобальное потепление, является выброс углекислого газа в результате работы электростанций [1].

В свою очередь, из всех инженерных систем практически любых видов объектов капитального строительства с большим строительным объемом (многоквартирные жилые дома, общественные и административные здания, торгово-развлекательные центры) наибольшее потребление электроэнергии в процессе эксплуатации наблюдается у систем кондиционирования воздуха (СКВ). Наибольшее распространение в настоящее время получили СКВ чиллер-фанкойл (охладитель жидкости) на базе компрессоров спи-

рального или винтового типа. Эффективность работы холодильной установки выражается коэффициентом энергопотребления EER. Он вычисляется как отношение холодопроизводительности системы к потребленной энергии. В современных СКВ EER варьируется от 2 до 6 единиц и зависит от условий эксплуатации. Увеличение коэффициента EER и поддержание его на высоком уровне является первостепенной задачей, начиная от стадии проектирования и заканчивая текущим и капитальным ремонтом СКВ [2–5, 12].

Энергоэффективность СКВ будет складываться из отношения холодопроизводительности системы к сумме затрат электроэнергии на привод насосов гидравлического контура, вентиляторов фанкойлов и компрессора чиллера. Более 90 % электроэнергии в системе чиллер-фанкойл затрачивается на привод компрессора. Поэтому особое внимание следует уделять увеличению EER, позволяющему уменьшить затраты электроэнергии и снизить выбросы углекислого газа электростанциями [1].

Материалы и методы

Одним из способов увеличения энергоэффективности СКВ чиллер-фанкойл является использование морской или речной воды для охлаждения конденсатора чиллера (охлаждателя жидкости), так как увеличение температуры конденсации приводит к повышенным затратам на сжатие хладагента вследствие повышения требуемого давления конденсации [6–10]. Температура конденсации зависит от температуры окружающей среды и, как правило, больше последней на 10–15 °С. То есть при воздушном охлаждении конденсатора чиллера при температуре окружающего воздуха 30–35 °С температура конденсации хладагента будет составлять не менее 45 °С.

В исследуемом варианте установки предлагается замена воздушного конденсатора на водяной, охлаждаемый морской водой. В качестве объекта капитального строительства примем гостиницу, которая должна располагаться в непосредственной близости к прибрежной зоне для исключения повышенных затрат на электроэнергию на привод насосов. Нагрузку на систему кондиционирования и холодоснабжения примем равной 500 кВт при условии расположения гостиницы в Краснодарском крае на побережье Черного моря.

В настоящее время известно две разновидности СКВ с охлаждением конденсатора: с первичным и вторичным охлаждающим контуром [9]. Примем схему СКВ с вторичным охлаждающим контуром (рис. 1).

Применение вторичного охлаждающего контура позволяет увеличить ресурс конденсатора 1 и снизить трудоемкость его технического обслуживания благодаря предварительной фильтрации и наличию промежуточного контура теплообмена. Также при наличии дополнительного (вторичного) контура охлаждения конденсатора предоставляется возможность сэкономить тепловую энергию на нагрев холодной воды для нужд горячего водоснабжения. Вторичный охлаждающий контур возможно также использовать на период проведения ремонта и чистки теплообменника 2 и фильтра 6 первого контура.

Установка СКВ с вторичным охлаждающим контуром работает следующим образом: винтовой компрессор сжимает хладагент до значения величины давления, соответствующей температуре конденсации, и направляет хладагент в конденсатор 1, представляющий собой паяный теплообменник. Парообразный хладагент в конденсаторе 1 за счет контакта с водой вторичного контура, образованного между теплообменниками 1 и 2, охлаждается, полностью конденсируется и направляется

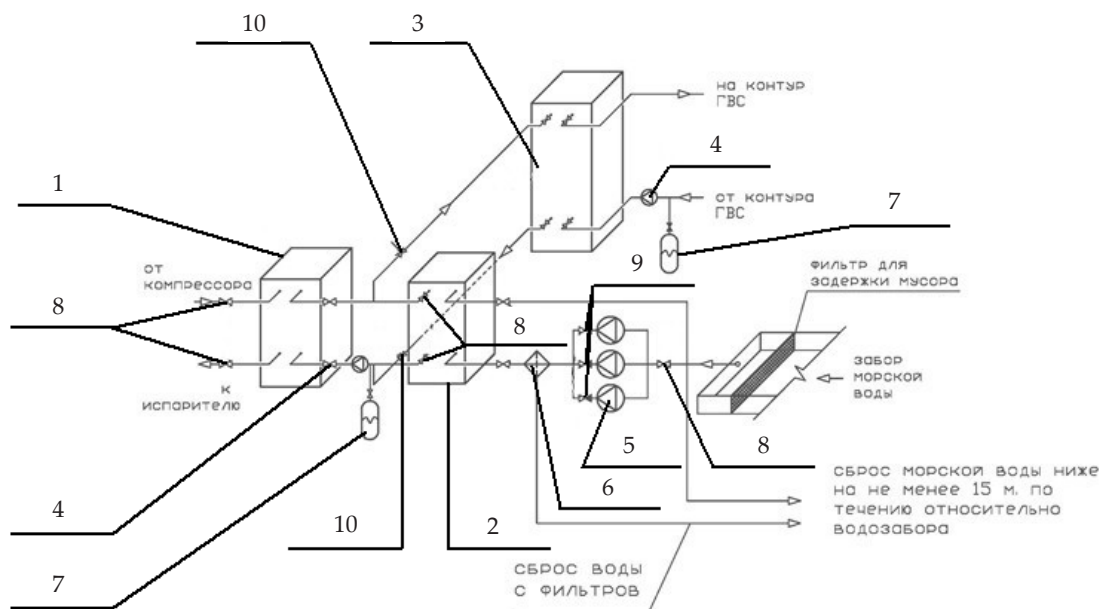


Рис. 1. Схема системы кондиционирования с вторичным охлаждающим контуром для охлаждения циркулирующей пресной воды с помощью морской воды и использования ее для нужд горячего водоснабжения:

1 – конденсатор; 2 – промежуточный теплообменник; 3 – теплообменник; 4 – циркуляционный насос; 5 – насос для подачи морской воды; 6 – самоочищающийся фильтр морской воды; 7 – мембранный бак; 8 – запорная арматура; 9 – обратный клапан; 10 – электромагнитный клапан

в жидком состоянии в испаритель чиллера. Первичный контур обеспечивает забор морской воды, поддержание постоянного давления и расхода в теплообменнике 2 насосами 5, фильтрацию с помощью самоочищающегося фильтра 6 и теплообмен с вторичным контуром посредством пластинчатого теплообменника 2. В схеме предусмотрен отбор теплоты на нужды горячего водоснабжения с помощью пластинчатого теплообменника 3 и насоса 4 системы горячего водоснабжения здания.

Для исследования энергоэффективности СКВ при использовании конденсатора с водяным охлаждением необходимо учитывать, что температура конденсации будет зависеть от расхода и температуры морской воды. Также энергоэффективность будет зависеть от степени загрузки компрессора, т. е. от выбранной ступени производительности. Степень регулирования производительности необходимо

учитывать для прогнозирования потребления электроэнергии в зависимости от количества посетителей гостиницы (загруженности номеров) и температуры наружного воздуха, которая сильно отличается в течение суток.

Распределение температуры воды в г. Сочи в период с 1 по 30 июня представлено на рис. 2 и в табл. 1 [11].

На основании уравнения теплового баланса [1], характера движения теплоносителя, температуры на входе и выходе из теплоносителей первичного и вторичного контура распределены следующим образом (рис. 3–5):

Выполним многофакторный эксперимент 3^2 по трем летним месяцам (июнь, июль, август). В качестве факторов выберем среднюю температуру морской воды и ступень производительности компрессора чиллера. Уровни варьирования факторов и план полного факторного эксперимента одного из трех месяцев приведены в табл. 2 и 3.

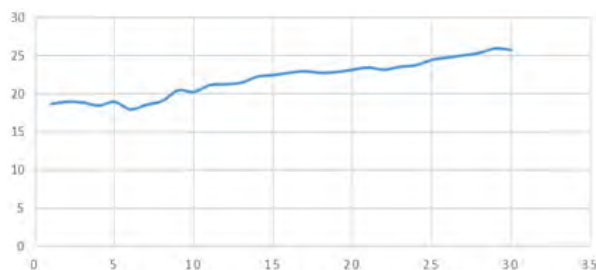


Рис. 2. Средняя расчетная температура морской воды в июне

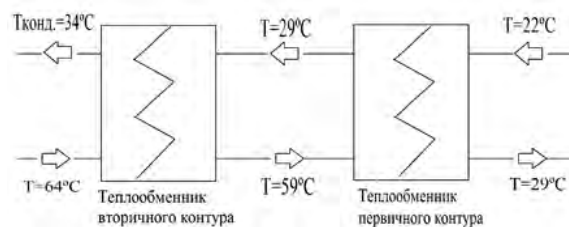


Рис. 4. Расчетная температура воды первичного и вторичного контура (июль)

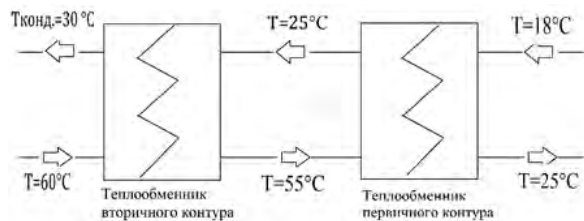


Рис. 3. Расчетная температура воды первичного и вторичного контура (июнь)

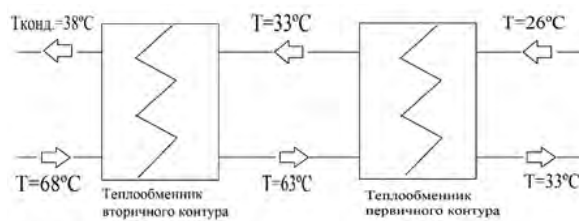


Рис. 5. Расчетная температура воды первичного и вторичного контура (август)

Таблица 1

Расчетная температура воды в июне

| День | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Температура морской воды, °C | 18,6 | 19,1 | 18,8 | 18,4 | 19,1 | 18,2 | 18,5 | 19,2 | 20,3 | 21,2 |
| День | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Температура морской воды, °C | 22,3 | 21,8 | 21,4 | 22,4 | 22,6 | 22,9 | 23,1 | 22,7 | 22,8 | 23,3 |
| День | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Температура морской воды, °C | 23,6 | 23,3 | 23,4 | 23,9 | 24,6 | 24,9 | 25,2 | 25,6 | 26,2 | 25,9 |

Таблица 2

Факторы, интервалы и уровни их варьирования (июнь)

| Уровни и интервалы варьирования | Факторы | |
|---------------------------------|--|--|
| | Температура воды $X_1, ^\circ\text{C}$ | Степень регулирования производительности $X_2, \%$ |
| Основной уровень, $x_1=0$ | 22 | 75 |
| Интервал варьирования, I_1 | 4 | 25 |
| Верхний уровень, $x_1=1$ | 26 | 100 |
| Нижний уровень, $x_1=-1$ | 18 | 50 |

Таблица 3

План полного факторного эксперимента 3^2 (июнь)

| Номер опыта | Кодовый масштаб | | Натуральный масштаб | |
|-------------|-----------------|-------|---------------------|-------|
| | X_1 | X_2 | X_1 | X_2 |
| 1 | -1 | -1 | 18 | 50 |
| 2 | 0 | -1 | 22 | 50 |
| 3 | 1 | -1 | 26 | 50 |
| 4 | -1 | 0 | 18 | 75 |
| 5 | 0 | 0 | 22 | 75 |
| 6 | 1 | 0 | 26 | 75 |
| 7 | -1 | 1 | 18 | 100 |
| 8 | 0 | 1 | 22 | 100 |
| 9 | 1 | 1 | 26 | 100 |

Результаты

Проведенный многофакторный эксперимент 3^2 позволил установить влияние температуры морской воды и степени загрузки компрессора чиллера на показатель EER энер-

гоэффективности системы кондиционирования воздуха, оборудованной вторичным охлаждающим контуром. В результате проведения многофакторного эксперимента получены данные и уравнения регрессии, показывающие зависимость EER от температуры морской воды и степени загрузки компрессора (табл. 4).

Поверхности отклика, полученные на основании уравнений регрессии исследования энергоэффективности СКВ чиллер-фанкойл с вторичным охлаждающим контуром, показаны на рис. 6–8.

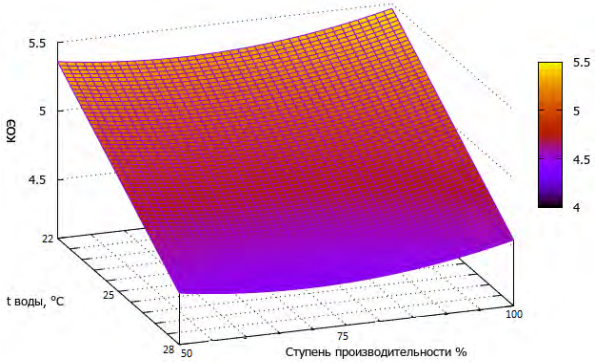


Рис. 7. Результаты многофакторного исследования EER в июле

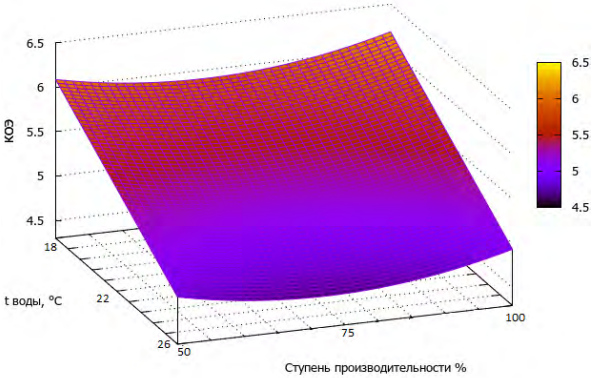


Рис. 6. Результаты многофакторного исследования EER в июне

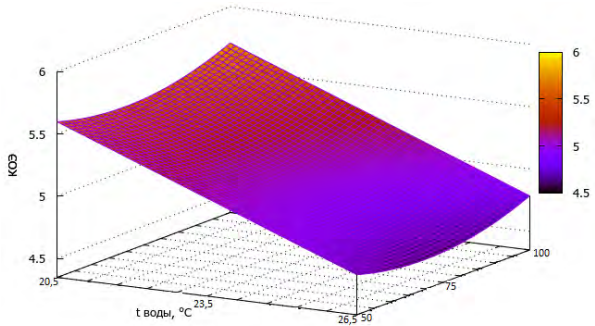


Рис. 8. Результаты многофакторного исследования EER в августе

Таблица 4

Уравнения регрессии, полученные в результате
многофакторного эксперимента исследования EER СКВ чиллер-фанкойл
с вторичным охлаждающим контуром

| Месяц | Параметр оптимизации | Уравнение регрессии |
|--------|----------------------|--|
| Июнь | EER | $Y_1 = 5,279 - 0,628X_1 + 0,052X_2 + 0,231X_2^2$ |
| Июль | EER | $Y_1 = 4,837 - 0,457X_1 + 0,053X_2 + 0,119X_2^2$ |
| Август | EER | $Y_1 = 5,057 - 0,463X_1 + 0,056X_2 + 0,134X_2^2$ |

Данные модели могут быть использованы для целей прогнозирования работы систем СКВ для определения энергозатрат в зависимости от температуры воды, а также требуемой ступени производительности компрессора холодильной установки.

Дискуссия

Проведенный полнофакторный эксперимент позволил установить влияние температуры морской воды за три месяца эксплуатации СКВ чиллер-фанкойл и ступени регулирования производительности компрессора на коэффициент энергоэффективности СКВ – EER. В ходе проведенных расчетов установлено, что самое минимальное значение отклика EER = 4,63 (июнь), EER = 4,37 (июль), EER = 4,6 (август) наблюдается при температуре морской воды $t_{\text{воды}} = 26^\circ\text{C}$ (июнь), $t_{\text{воды}} = 28^\circ\text{C}$ (июль), $t_{\text{воды}} = 26,5^\circ\text{C}$ (август) и ступени производительности 75 % (июнь, июль, август).

Максимальное значение отклика EER = 6,11 (июнь), EER = 5,45 (июль), EER = 5,69 (август) наблюдается при температуре морской воды $t_{\text{воды}} = 18^\circ\text{C}$ (июнь), $t_{\text{воды}} = 22^\circ\text{C}$ (июль), $t_{\text{воды}} = 20,5^\circ\text{C}$ (август) и ступени производительности 100 % (июнь, июль, август).

Выявлено, что минимальное значение EER наблюдается при 75 % производительности компрессора. Это в первую очередь связано с технологическим процессом сжатия хладагента в винтовом компрессоре. Поэтому при изменении максимальной степени сжатия на 25 % наблюдается наиболее выгодное потребление электрической энергии компрессором.

Выводы

На основании уравнения регрессии и наглядного изображения поверхности отклика можно сделать заключение, что наибольшее влияние на коэффициент энергоэффективности СКВ – EER оказывает температура морской воды. Ступенчатое регулирование производи-

тельности компрессора позволяет сгладить неравномерное потребление «холода» в течение дня, в зависимости от пиковых значений температур наружного воздуха.

Полученные данные результатов многофакторного исследования позволяют сделать вывод о том, что температура морской воды будет оказывать значительное влияние на энергоэффективность СКВ чиллер-фанкойл. Результаты экспериментов могут быть использованы при конструировании и последующей эксплуатации усовершенствованных систем кондиционирования с конденсатором, охлаждаемым морской водой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белова Е. М. Кондиционирование воздуха с чиллерами и фанкойлами. М.: Евроклимат, 2003. 398 с.
2. Белова Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях. М.: Евроклимат, 2006. 639 с.
3. Королева А. Н. Современные подходы к кондиционированию жилых зданий // Молодой ученый. 2019. № 9 (247). С. 99–101. <https://moluch.ru/archive/247/56896> (дата обращения: 30.12.2021).
4. Переверзева И. С., Павлов С. А. Современные подходы к кондиционированию жилых и общественных зданий // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2015. Т. 3. С. 280–286.
5. BITZER Software v6.17.3 rev2611 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.bitzer.de/websoftware/Calculate.aspx?cid=1624970190444&mod=CS> (дата обращения: 30.12.2021).
6. Optimal design of air-conditioning systems using deep seawater / Ilse María Hernández-Romero, Fabricio Nápoles-Rivera, Rajib Mukherjee, Medardo Serna-González, Mahmoud M. El-Halwagi // Clean Technologies and Environmental Policy. 2018. Vol. 20. P. 639–654.
7. High velocity seawater air-conditioning with thermal energy storage and its operation with intermittent renewable energies / Ilse María Hernández-Romero, Fabricio Nápoles-Rivera, Rajib Mukherjee, Medardo Serna-González, Mahmoud M. El-Halwagi // Energy Efficiency. 2020. Vol. 13. P. 1825–1840.

8. Julian David Hunt, Edward Byers, Antonio Santos Sánchez. Technical potential and cost estimates for seawater air conditioning // *Energy*. 2019. Vol. 166. P. 979–988.

9. Sea Water Air Conditioning [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.makai.com/sea-water-air-conditioning> (дата обращения: 30.12.2021).

10. Elsafty A., Saeid L. Sea water air conditioning // *International Journal of Engineering*. 2009. N 3(3). P. 346–358.

11. Температура воды в Сочи [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/sochi/water/> (дата обращения: 30.12.2021).

12. Davidson J. California energy future and cold ocean water // *Sea Technology*. 2003. N 44(7). P. 30–34.

11. Water temperature in Sochi. Available at: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/sochi/water> (accessed 30 December 2021)

12. Davidson J. California energy future and cold ocean water. *Sea Technology*. 2003. N 44(7). P. 30–34.

REFERENCES

1. Belova E.M. *Kondicionirovanie vozduha s chilleraми i fjenkojlamami* [Air conditioning with chillers and fan-coyles]. Moscow, Euroclimate, 2003. 398 p.

2. Belova E.M. *Central'nye sistemy kondicionirovaniya vozduha v zdaniyah* [Central air conditioning systems in buildings]. Moscow, Euroclimate, 2006. 639 p.

3. Koroleva A.N. Modern approaches to air conditioning of residential buildings. *Molodoj uchenyj* [Young scientist], 2019, no. 9(247), pp. 99–101. (in Russian) Available at: <https://moluch.ru/archive/247/56896> (accessed 30 December 2021)

4. Pereverzeva I.S., Pavlov S.A. Modern approaches to air conditioning of residential and public buildings. *Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii FAD TOGU* [New ideas of the new century: materials of the international scientific conference of the FAD TOGU]. 2015, V. 3, pp. 280–286. (In Russian)

5. BITZER Software v6.17.3 rev2611. Available at: <https://www.bitzer.de/websoftware/Calculate.aspx?cid=1624970190444&mod=CS> (accessed 30 December 2021)

6. Ilse María Hernández-Romero, Fabricio Nápoles-Rivera, Rajib Mukherjee, Medardo Serna-González, Mahmoud M. El-Halwagi. Optimal design of air-conditioning systems using deep seawater. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2018. Vol. 20. P. 639–654.

7. Julian David Hunt, Behnam Zakeri, Andreas Nascimento, Bruno Garnier, Márcio Giannini Pereira, Rodrigo Augusto Bellezoni, Natália de Assis Brasil Weber, Paulo Smith Schneider, Pedro Paulo Bezerra Machado, Dorel Soares Ramos. High velocity seawater air-conditioning with thermal energy storage and its operation with intermittent renewable energies. *Energy Efficiency*. 2020. Vol. 13. P. 1825–1840.

8. Julian David Hunt, Edward Byers, Antonio Santos Sánchez. Technical potential and cost estimates for seawater air conditioning. *Energy*. 2019. Vol. 166. P. 979–988.

9. Sea Water Air Conditioning. Available at: <https://www.makai.com/sea-water-air-conditioning> (accessed 30 December 2021)

10. Elsafty A., Saeid L. Sea water air conditioning. *International Journal of Engineering*. 2009. N 3(3). P. 346–358.

Об авторах:

ЕДУКОВ Дмитрий Алексеевич

кандидат технических наук,
доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: inbox163@inbox.ru

САЙМАНОВА Ольга Гавриловна

кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры технологии и организации
строительного производства
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: tosp@samgtu.ru

ЕДУКОВ Василий Алексеевич

кандидат технических наук,
доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: edukov-v@yandex.ru

EDUKOV Dmitry A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the
Heat and Gas Supply and Ventilation Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: inbox163@inbox.ru

SAIMANOVA Olga G.

PhD in Economics, Associate Professor of the Technology
and Organization of Construction Production Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: tosp@samgtu.ru

EDUKOV Vasily A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the
Heat and Gas Supply and Ventilation Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: edukov-v@yandex.ru

Для цитирования: Едуков Д.А., Сайманова О.Г., Едуков В.А. Исследование энергоэффективности системы кондиционирования воздуха с вторичным охлаждающим контуром // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 1. С. 67–73. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.9.

For citation: Edukov D.A., Saimanova O.G., Edukov V.A. Energy Efficiency Study of the System Air Conditioning with Secondary Cooling Circuit. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 1, pp. 67–73. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.9.