

УДК 697.9

## Экспериментальное исследование характеристик активного теплоутилизатора при изменяющихся условиях эксплуатации

Канд. техн. наук С. С. МУРАВЕЙНИКОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук А. Б. СУЛИН<sup>2</sup>,

канд. техн. наук А. А. НИКИТИН<sup>3</sup>, К. МАКАТОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>mur\_618@mail.ru, <sup>2</sup>miconata@rambler.ru, <sup>3</sup>andyquest@mail.ru, <sup>4</sup>kirmakatov@mail.ru

Университет ИТМО

*В данной статье приводятся результаты экспериментального исследования активного теплоутилизатора СНАБ. 065171.001–01 в качестве основного нагревателя системы вентиляции реального объекта. Описаны результаты определения уточненных номинальных характеристик производительности, энергопотребления и коэффициента преобразования активного теплоутилизатора. Приведены результаты расчета эмпирических коэффициентов, необходимых для расчетного определения данных характеристик в произвольных условиях эксплуатации. Продемонстрировано применение методики технико-экономической оценки активных теплоутилизаторов для определения характеристик устройства при изменении расходов воздуха и температурного режима эксплуатации. Результаты расчета эксплуатационных характеристик сопоставлены с результатами натурных экспериментов для определения степени достоверности предложенной методики.*

**Ключевые слова:** системы вентиляции и кондиционирования, утилизация теплоты, тепловой насос, экспериментальное исследование, технико-экономический анализ, среднегодовые характеристики.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 13.09.2022, одобрена после рецензирования 20.10.2022, принята к печати 11.11.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-84-90

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Муравейников С. С., Сулин А. Б., Никитин А. А., Макатов К. Экспериментальное исследование характеристик активного теплоутилизатора при изменяющихся условиях эксплуатации. // Вестник Международной академии холода. 2022. № 4. С. 84–90. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-84-90

## Experimental study of the characteristics of an active heat exchanger under changing operating conditions

Ph. D. S. S. MURAVEINIKOV<sup>1</sup>, D. Sc. A. B. SULIN<sup>2</sup>, Ph. D. A. A. NIKITIN<sup>3</sup>, K. MAKATOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup>mur\_618@mail.ru, <sup>2</sup>miconata@rambler.ru, <sup>3</sup>andyquest@mail.ru, <sup>4</sup>kirmakatov@mail.ru

ITMO University

*This article presents the results of an experimental study of the active heat exchanger SNAB. 065171.001–01 as the main heater of the ventilation system of a real object. The results of determining the specified nominal characteristics of productivity, energy consumption and COP of an active heat exchanger are described. The results of the calculation of empirical coefficients necessary for the calculation of these characteristics in arbitrary operating conditions are presented. The application of the method of technical and economic evaluation of active heat exchangers to determine the characteristics of the device with a change in air flow and operating temperature is demonstrated. The results of calculating the performance characteristics are compared with the results of full-scale experiments to determine the degree of reliability of the proposed methodology.*

**Keywords:** ventilation and air conditioning systems, heat recovery, heat pump, experimental research, technical and economic analysis, annual average characteristics.

### Article info:

Received 13/09/2022, approved after reviewing 20/10/2022, accepted 11/11/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-84-90

Article in Russian

### For citation:

Muraveinikov S. S., Sulin A. B., Nikitin A. A., Makatov K. Experimental study of the characteristics of an active heat exchanger under changing operating conditions. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 4. p. 84–90. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-84-90

## Введение

Условия эксплуатации оборудования систем вентиляции и кондиционирования в большинстве случаев не совпадают с условиями, для которых это оборудование было спроектировано. В практике серийного производства целесообразно снижение количества типоразмеров и их более глубокая унификация с целью снижения производственных и логистических издержек. В наибольшей степени это справедливо для подсистем парокомпрессионного охлаждения и активной теплоутилизации, конструкция которых включает большое количество серийных изделий [1]. В то же время при проектировании и строительстве зданий формируются уникальные условия эксплуатации, продиктованные как задачами, стоящими перед системой вентиляции [2, 3], так и объективными внешними факторами, например климатическими условиями [4, 5]. Как следствие, номинальные характеристики оборудования, заложенные при его разработке и заявленные производителем, наблюдаются в пренебрежимо малый относительно срока эксплуатации период времени [6].

Оценки коэффициента преобразования (англ. Coefficient Of Performance, COP) систем активной теплоутилизации приводимые в технической документации к оборудованию редко совпадают с реальными показателями на объекте, о чем свидетельствуют экспериментальные исследования их эксплуатации [7]–[9]. В работе [10] предложена методика расчета количества производимой тепловой энергии и электропотребления в среднегодовом выражении, учитывающая изменения условий эксплуатации относительно проектных значений. Методика учитывает особенности регулирования производительности устройства, изменение расходов воздуха в приточном и вытяжном воздуховоде, а также изменения температуры, поступающего на теплообменные аппараты. В качестве исходных данных в предложенной методике используются паспортные значения производительности и коэффициента преобразования, временной график изменения параметров воздушной среды (климатический профиль региона эксплуатации или график режимов работы объекта технологического кондиционирования), а также ряд эмпирических коэффициентов. В [11] предложена конструкция испытательного стенда, позволяющая получить данные, необходимые для применения расчетной методики в условиях производства при проведении определительных испытаний.

## Объект и задачи исследования

Для оценки сходимости расчетной методики с результатами экспериментального исследования необходимо провести серию экспериментов для определения уточнённых номинальных характеристик и эмпирических коэффициентов. Затем с использованием полученных данных, на основании методики [10], выполнить расчет характеристик устройства в условиях работы, отличных от номинальных. Условия, аналогичные исходным данным моделирования, должны быть повторены на испытательном стенде для получения реальных значений характеристик устройства и их последующего сравнения с результатами моделирования.

Верификация предложенных методик выполнена путем экспериментального исследования опытного образца активного теплоутилизатора СНАБ. 065171.001, используемого в качестве основного и единственного теплоутилизатора приточно-вытяжной вентиляционной. Условия эксплуатации рассматриваемого образца согласно конструкторской и эксплуатационной документации: расходы воздуха в приточном и вытяжном канале — 2500 м<sup>3</sup>/ч. Температура воздуха в обслуживаемом помещении соответствует значению уставки температуры в приточном воздуховоде и составляет 22 °С. Процесс утилизации тепловой энергии в испарителе втяжного канала протекает без выпадения конденсата.

В период проведения исследования опытный образец был встроен в вентиляционную систему лаборатории систем жизнеобеспечения в соответствии со схемой на рис. 1. Существующие компоненты приточной линии и лабораторной системы вентиляции, реализующие тепло-влажностную обработку воздуха, на период испытаний были отключены.

В рамках исследования проведено шесть экспериментов, продолжительностью 1200 с. Время установления стабильного режима работы системы выбиралось исходя из условий стабильности параметров в контрольных точках. Условия эксплуатации (температурный в контрольных точках), создаваемые на испытательном стенде в рамках определительных и контрольных экспериментов должны быть устойчивыми и не относиться к переходным режимам работы системы, поддерживаться стабильно в течении периода, достаточного для получения необходимых экспериментальных данных. В течении указанных периодов изменение температур в контрольной точке не должно превышать 1 К.

Представленная конфигурация объекта исследования отличается от конструкции испытательного стенда, предложенной в работе [11] в части возможностей регулирования расходов воздуха и температуры перед теплообменным аппаратом приточной линии. Расход воздуха лабораторной системы вентиляции регулируется ступенчато. Изменение расхода воздуха осуществляется посредством двух пятиступенчатых регуляторов скорости вентиляторов Remak TRN 7D, переключаемых совместно системой автоматического управления. В связи с этим плавное регулирование скорости вращения вентиляторов, позволяющее обеспечить равномерное линейное изменение расходов воздуха как предложено в [11] недоступно. Для пяти доступных режимов управления расходом были получены значения средних скоростей воздуха в каналах с учетом дополнительного сопротивления, оказываемого теплообменными аппаратами исследуемого образца соответствии с ГОСТ 12.3.018–79 [15]. На основании измерений скоростей при известных сечениях воздухопроводов рассчитаны значения объемных расходов воздуха. Измерения скоростей воздуха выполнены с использованием термоанемометра с обогреваемой струной Testo 06351543, накопление данных с зонда осуществлялось многофункциональным прибором Testo 480. Рассчитанные значения объемных расходов воздуха приведены в табл. 1 с округлением до десятков.

Свойства воздуха в контрольной точке 1 стенда, показанного на рис. 1, соответствуют параметрам воздуха

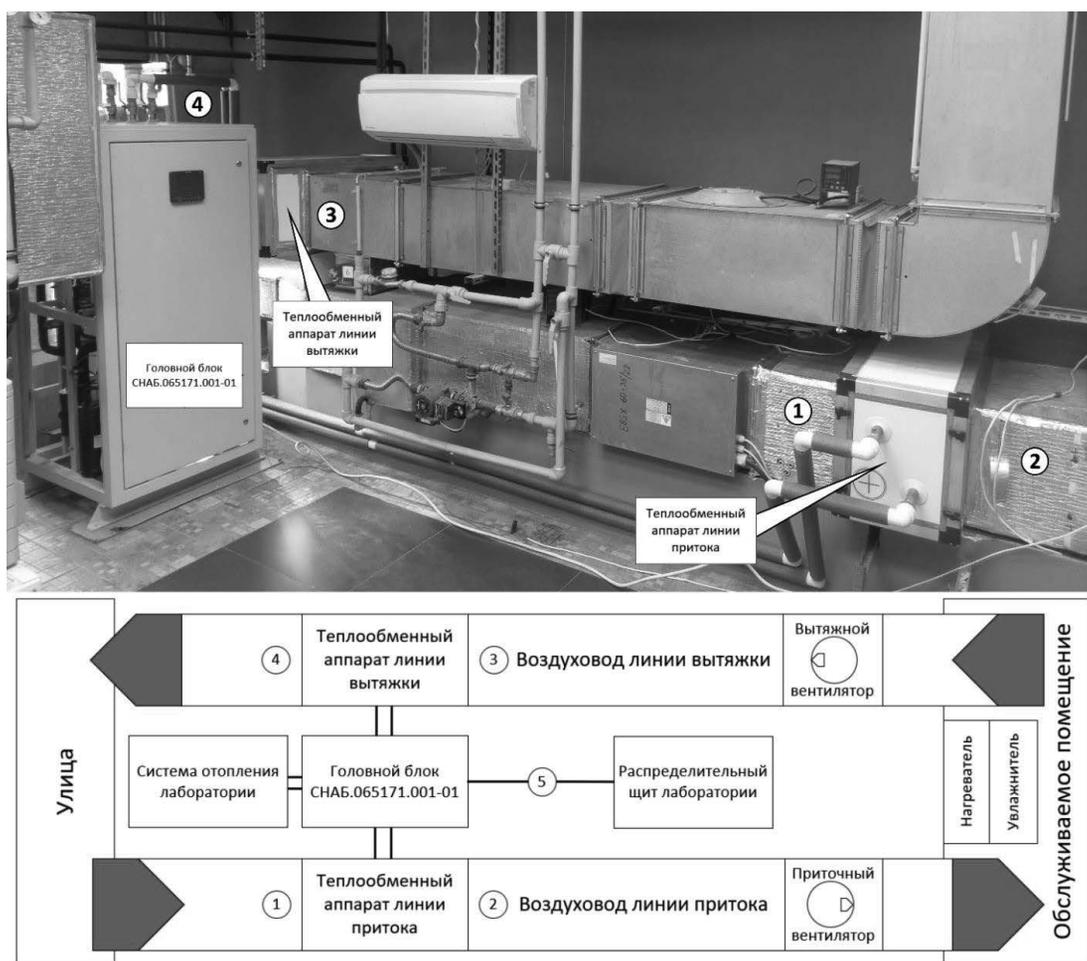


Рис. 1. Фото и схема включения объекта испытаний

Fig. 1. Photo and circuit diagram of the test object

на улице с учетом подогрева на участке от входа воздуховода в помещение до точки измерения и характеризуют начальную точку процесса нагрева в теплообменном аппарате линии притока. Параметры воздуха в точке 2 характеризуют состояние воздуха в конце процесса нагрева. Нагретый воздух поступает в контрольную точку 3 испытательного стенда через системы приточных и вытяжных воздухораспределителей и обслуживаемое помещение. Для исключения влияния теплопритоков температура в помещении поддерживалась на уровне уставки притока при помощи переносного регулируемого электронагревателя. Параметры воздуха в точках 3 и 4 испытательного стенда характеризуют соответственно начало и конец процесса охлаждения воздуха в теплообменном аппарате вытяжной линии.

Данные о свойствах воздуха в контрольных точках объекта исследования получены с помощью набора термогигрометров Testo 605i, объединенных в сеть накопления данных посредством протокола Bluetooth с разрешением одно измерение в секунду.

Данные об электропотреблении исследуемого образца получены при помощи трехфазного электрического трехфазный Carel Energy Meter 3, регистрирующего напряжение, частоту тока, активную и реактивную мощность, а также потребление за временной период независимо по трем фазам. Данные измерений счетчика реги-

стрировались системой энергомониторинга Carel Plant Watch PRO с разрешением одно измерение в секунду.

### Определение максимальной производительности

Для определения максимальной производительности согласно [11] рекомендуется на испытательном стенде обеспечить условия эксплуатации, соответствующие паспортным по параметрам расходов воздуха обслуживаемой системы вентиляции и температурным режимам. В рамках настоящего исследования расходы воздуха приняты максимально близкими к паспортным в рамках доступного для лабораторного стенда диапазона, представленного в табл. 1:  $L_{п. ном.} = 2150 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_{в. ном.} = 2300 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

При выбранных расходах воздуха, поддерживаемой в соответствии с уставкой для приточного воздуха температуре помещения и вытяжного канала в точке 3 проведен ряд предварительных экспериментов. Задачей данных экспериментов является определение температуры в точке 1 испытательного стенда при которой система автоматического управления утилизатора установит регулирование производительности на значении 100%.

Эксперимент № 1 проведен при температуре в точке 1 стенда при которой исследуемый образец полностью обеспечивал потребность вентиляционной системы в на-

греве приточного воздуха при степени регулирования производительности 100%. При проведении эксперимента № 1 в течение всего периода регистрации данных были соблюдены условия стабильности режима работы: колебание значений температур в точке 1 не должно превышать 1 К, а степень регулирования производительности устройства должна быть постоянной. В течение 1200 с при регистрации температур в контрольных точках с частотой 1 раз в 1 с сформирован массив данных, характеризующих протекание процессов нагрева и охлаждения воздуха теплообменными аппаратами исследуемого устройства. В указанный период времени температура воздуха в точке 1 колебалась в диапазоне от 1 °С до 1,8 °С. При усреднении данных за период наблюдения принято значение  $t_{н. ном.} = 1,43$  °С,  $t_{в. ном.} = 22,1$  °С.

За период проведения эксперимента № 1 зарегистрировано изменение количества потребленной электрической энергии  $\Delta N_{т1} = 0,89$  кВт·ч. Усредненное энергопотребление при полной производительности теплоутилизатора  $N_{ном.}$  составило 2,67 кВт.

При известных параметрах начала и конца процесса нагрева воздуха в приточном теплообменном аппарате и известном расходе воздуха в приточном воздуховоде рассчитаны значения уточненной номинальной производительности и номинального COP:

$$Q_{НОМ}^{УТ} = \frac{L_{ПР} \rho_{В} c_{В} (t_{П} - t_{Н.НОМ})}{3600}; \quad (1)$$

$$COP_{НОМ} = \frac{Q_{НОМ}^{УТ}}{N_{НОМ}}. \quad (2)$$

Данные эксперимента № 1, а также результаты расчета уточненных номинальных характеристик по выражениям (1) и (2) приведены на рис. 2. По результатам усреднения данных эксперимента № 1 приняты следующие значения уточненных номинальных характеристик:  $Q_{НОМ} = 15$  кВт;  $N_{НОМ} = 2,63$  кВт;  $COP_{НОМ} = 5,7$ . Принятые для дальнейших расчетов номинальные условия эксплуатации:  $L_{П.НОМ.} = 2150$  м³/ч,  $L_{В.НОМ.} = 2300$  м³/ч,  $t_{Н.НОМ.} = 1,4$  °С,  $t_{В.НОМ.} = 22$  °С.

### Определение эмпирических коэффициентов

Для расчета характеристик теплоутилизатора, оснащенного системой регулирования производительности в произвольных условиях эксплуатации необходимо определить значение коэффициента  $k_{рег}^{COP}$ . Условия проведения эксперимента № 2 должны быть повторены, в соответствии с условиями проведения эксперимента, в рамках которого определялись номинальные характеристики исследуемого устройства. При этом температура воздуха в точке 1 стенда должна быть отклонена, в рассматриваемом случае это отклонение обеспечивалось изменением температуры наружного воздуха. Система автоматического управления устройства в таком случае изменит степень регулирования производительности теплоутилизатора в соответствии с изменением потребления тепловой энергии на нагрев приточного воздуха.

В рамках данного эксперимента в течении 1200 с наблюдались степень регулирования производительности 73% температуры в точке 1 стенда в диапазоне от 6,3 °С

Таблица 1

### Расход воздуха лабораторного стенда

Table 1

#### Laboratory stand air consumption

Режим управления расходом	Расход воздуха в приточном воздуховоде, м³/ч	Расход воздуха в вытяжном воздуховоде, м³/ч
Режим 1	1330	1450
Режим 2	1610	1720
Режим 3	1830	1960
Режим 4	1980	2130
Режим 5	2150	2300

до 7,1 °С. Регистрация данных о температурах в контрольных точках и электропотреблении производилась аналогично экспериментам № 1 и № 2 при соблюдении условий стабильности режима, результаты измерений представлены на рис. 2.

За период проведения эксперимента № 2 зарегистрировано изменение количества потребленной электрической энергии  $\Delta N_{т2} = 0,69$  кВт·ч. Усредненное энергопотребление, при степени регулирования производительности устройства 73%  $N_{2,т}$ , составило 2,67 кВт. Результаты расчета производительности и COP по (1) и (2) в данном режиме приведены на рис. 2.

С учетом особенностей технологии регулирования компрессора DigitalScroll, наблюдаемых при данном регулировании температурных пульсаций и неравномерности электропотребления вычисление эмпирического коэффициента  $k_{рег}^{COP}$  проводилось для расширенного количества наборов данных (условных режимов)  $n = 1200$ .

$$k_{рег}^{COP} = \frac{\sum \frac{COP_i}{COP_{НОМ}} - 1}{n} \cdot t_i - t_{Н.НОМ}. \quad (3)$$

Значение коэффициента, полученное в результате вычислений, составило:  $k_{рег}^{COP} = -0,017$ .

Задачей эксперимента № 3 являлось определение эмпирического коэффициента  $a_{COP}$ . Условия проведения эксперимента № 3 характеризуются отклонением расходов воздуха в приточном и вытяжном воздуховодах от номинальных значений (режим 3, табл. 1) при температуре воздуха в точке 3  $t_{в.3} = t_{в. ном.} = 22$  и произвольном значении температуры в контрольной точке 1. Регистрация данных о температурах в контрольных точках и электропотреблении производилась аналогично экспериментам № 1 и № 2 при соблюдении условий стабильности режима, результаты измерений представлены на рис. 2.

За период проведения эксперимента № 3 зарегистрировано изменение количества потребленной электрической энергии  $\Delta N_{т3} = 0,621$  кВт·ч. Усредненное энергопотребление при степени регулирования производительности устройства 51%  $N_2$ , составило 1,86 кВт. Результаты расчета производительности и COP по (1) и (2) в данном режиме приведены на рис. 2.

Как и в эксперименте № 2 вычисление эмпирического коэффициента  $a_{COP}$  проводилось для расширенного количества наборов данных (условных режимов)  $n = 1200$  по выражению (4):

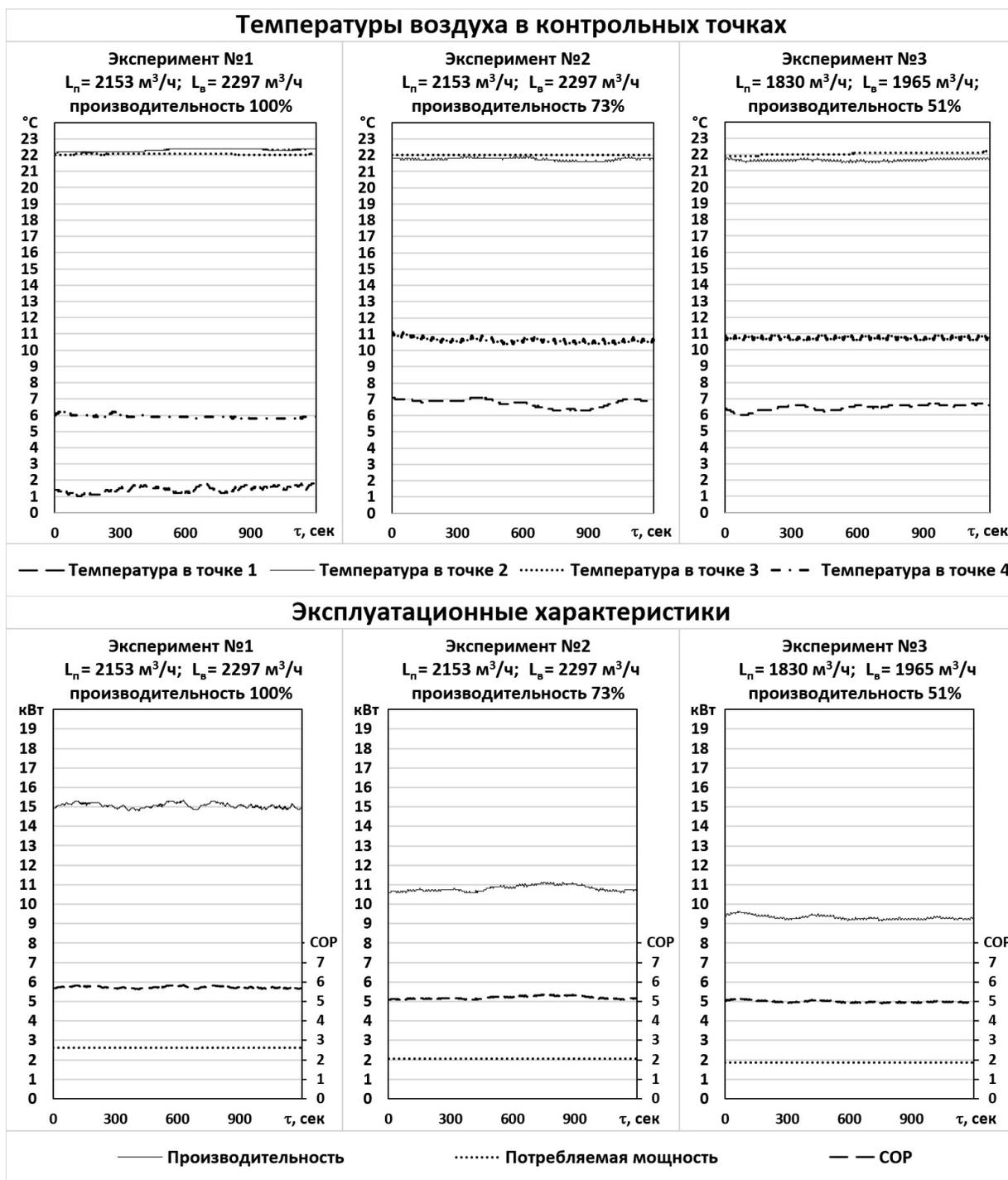


Рис. 2. Данные измерений температур и расчета эксплуатационных характеристик в определяющих экспериментах  
 Fig. 2. Data of temperature measurements and calculation of operational characteristics in determinative experiments

$$a_{COP} = \frac{\sum \left( \frac{1}{\frac{G_{B,НОМ} - G_B}{G_{B,НОМ}}} \left( \frac{COP_i}{COP_{НОМ} \cdot \frac{L_i}{L_{НОМ}} (1 + (c_{COP} + k_{рег}^{COP})(t_n - t_{н,НОМ}))} - 1 \right) \right)}{n} \quad (4)$$

Значение коэффициента, полученное в результате вычислений, составило:  $a_{COP} = 0,845$ .

#### Верификация расчетной методики

Расчет коэффициента преобразования активного теплоутилизатора, работающего в условиях эксплуата-

ции, отличных от номинальных может быть произведен по выражению (5):

$$COP_i = COP_{НОМ} \left( \left( 1 + a_{COP} \frac{G_{B,НОМ} - G_B}{G_{B,НОМ}} \right) \cdot \frac{L_{П}}{L_{П,НОМ}} \right) (1 + k_{рег}^{COP} (t_{н,гр} - t_{н,НОМ})). \quad (5)$$

В расчете используются значения полученных ранее эмпирических коэффициентов, номинальное значение коэффициента преобразования  $COP_{НОМ}$  и набор параме-

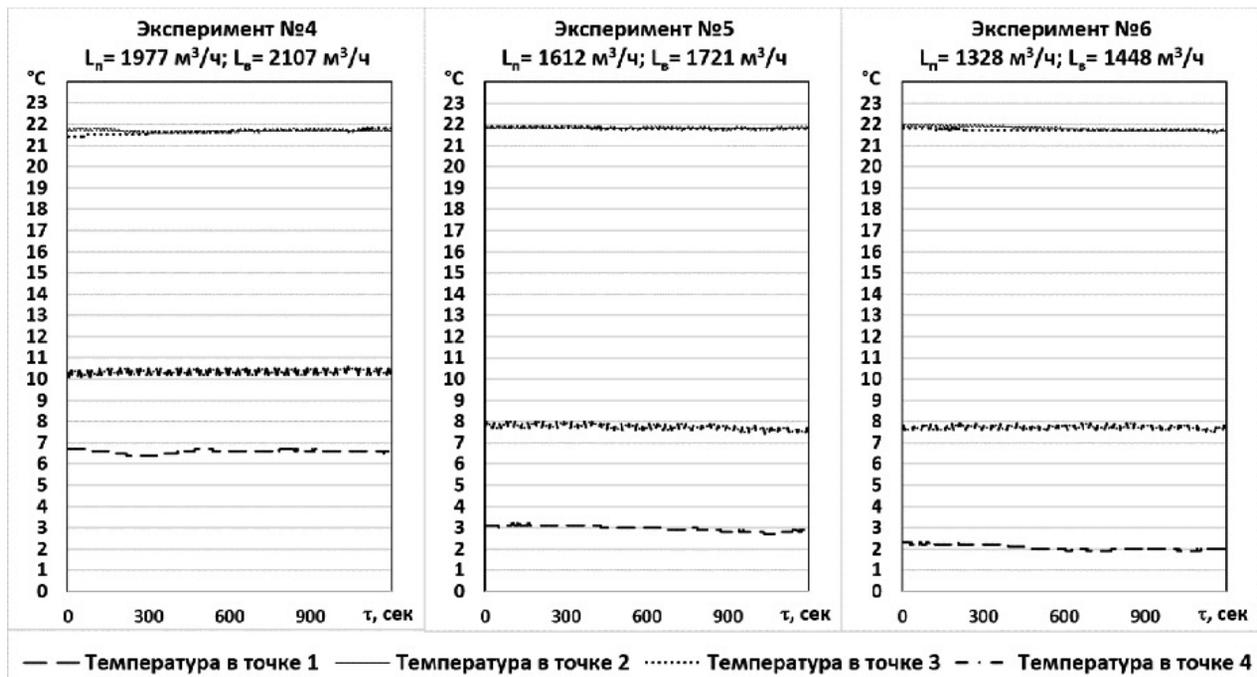


Рис. 3. Данные измерений температур в контрольных экспериментах  
 Fig. 3. Temperature measurement data in control experiments

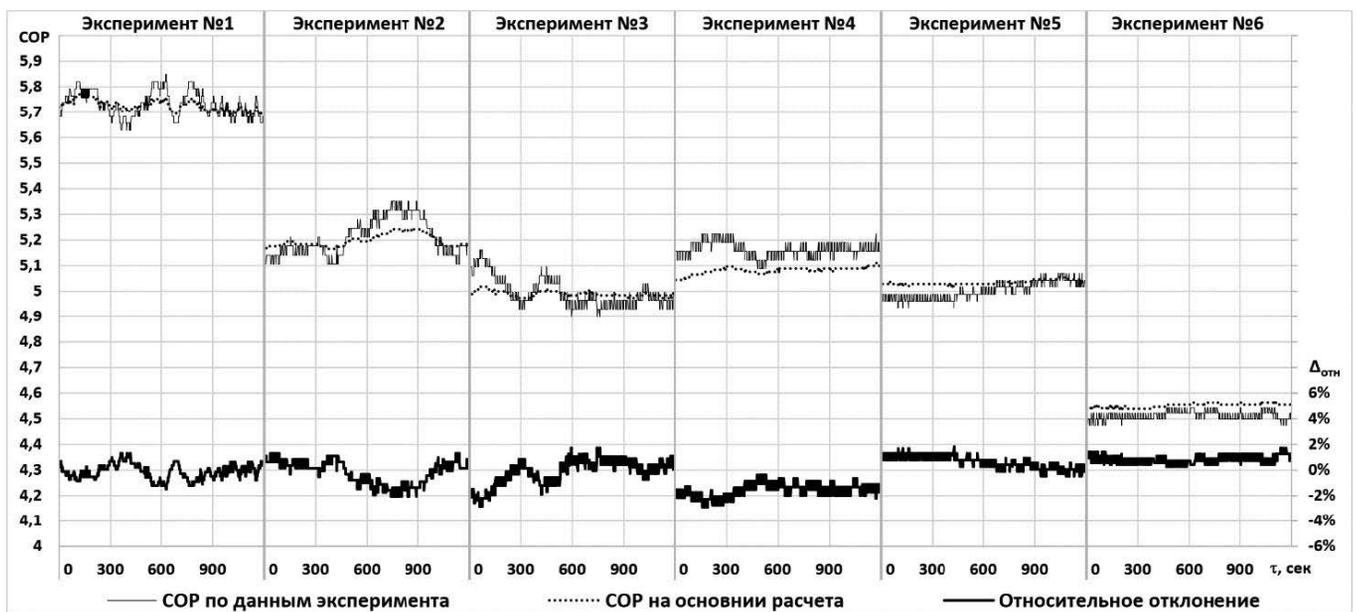


Рис. 4. Сравнение значений коэффициента преобразования, полученных расчетным и экспериментальным способом  
 Fig. 4. Comparison of the values of the conversion coefficient obtained by the calculated and experimental method

тров, определяющих исследуемые условия эксплуатации:  $L_n, L_v$  и  $t_n$ .

Эксперименты № 4, № 5 и № 6 проведены в качестве контрольных для верификации способа расчетного определения  $COP_i$ . Условия проведения данных трех экспериментов представлены на рис. 3. Приведены значения расходов воздуха в приточных и вытяжных воздуховодах и температуры в контрольных точках испытательного стенда. Зарегистрированное электропотребление теплотутилизатора в ходе экспериментов № 4, 5 и 6 составило 1,94 кВт, 2,03 кВт и 1,93 кВт, соответственно.

С использованием выражения (5) для известных температур были получены значения  $COP_i$  для условий эксплуатации, характеризующимися известными расходами воздуха и температурой в точке 1. Для произвольного проектируемого объекта расходы воздуха, как правило, известны, температуры в точке 1 могут быть выбраны на основании климатических данных региона эксплуатации.

На рис. 4 приведены результаты расчета  $COP_i$  как с использованием ограниченного набора данных по выражению (5):  $COP_i^{расч}$ , так и на основании полного мас-

сива данных, полученных в рамках контрольных экспериментов по формулам (1) и (2):  $COP_i^{экс}$ . В нижней части рисунка приведены значения относительного отклонения расчетного и контрольного параметров:

$$\Delta_{отн} = \frac{COP_i^{расч} - COP_i^{экс}}{COP_i^{экс}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Сравнение расчетных и контрольных величин и значения их относительного отклонения показаны на рис. 5 для всей серии экспериментов, проведенных в рамках исследования. Границы экспериментов характеризуются отрезками условной временной шкалы с шагом 1200 с.

В рамках контрольных экспериментов расчетная методика демонстрирует высокую степень точности на участке регулирования производительности активного теплоутилизатора. Относительное отклонение расчетного коэффициента преобразования от полученного экспериментально во всех экспериментах не превысило 3%.

**Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (тема № МК-4773.2022.4).**

### Литература/References

- Goetzler W. et al. Energy savings potential and RD&D opportunities for commercial building HVAC systems. Navigant Consulting, Burlington, MA (United States), 2017. №. DOE/EE-1703.
- Satrio P. et al. Optimization of HVAC system energy consumption in a building using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2019. vol. 35. p. 48–57.
- Sulin A. B. et al. Algorithm for preventive regulation of the ventilation system. *AIP Conference Proceedings*. — AIP Publishing LLC, 2021. vol. 2412. no. 1. p. 030028.
- Cao J. et al. Effects of climate change on outdoor meteorological parameters for building energy-saving design in the different climate zones of China. *Energy and buildings*. 2017. vol. 146. p. 65–72.
- de Rubeis T. et al. Sensitivity of heating performance of an energy self-sufficient building to climate zone, climate change and HVAC system solutions. *Sustainable Cities and Society*. 2020. vol. 61. p. 102300.
- Devecioğlu A. G. Seasonal performance assessment of refrigerants with low GWP as substitutes for R410A in heat pump air conditioning devices. *Applied Thermal Engineering*. 2017. vol. 125. p. 401–411.
- Littlewood J. R., Smallwood I. One year temperature and heat pump performance for a micro-community of low carbon dwellings, in Wales, UK. *Energy Procedia*. 2017. vol. 111. p. 387–396.
- D O’Sullivan P. et al. Evaluation of the theoretical and in-use performance of Exhaust Air Heat Pumps. *E3S Web of Conferences*. — EDP Sciences, 2021. vol. 246. p. 06003.
- Mikola A. et al. The efficiency analysis of the exhaust air heat pump system. *Engineering*. 2014. vol. 6. no 13. p. 1037.
- Муравейников С. С., Сулин А. Б., Баранов И. В., Рябова Т. В. Методика оценки эффективности применения систем утилизации теплоты вытяжного воздуха// Вестник Международной академии холода. 2020. № 3. С. 21–26. [Muraveinikov S. S., Sulin A. B., Baranov I. V., Ryabova T. V. Evaluation technique for the efficiency of the exhaust air heat recovery systems. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 3. p. 21–26. (in Russian)]
- Муравейников С. С. и др. Экспериментально-расчетная оценка среднегодовой эффективности теплоутилизаторов климатических систем //Холодильная техника. 2019. №. 12. С. 34–38. [Muraveynikov S. S. et al. Experimental and calculated assessment of the average annual efficiency of heat exchangers of climatic systems. *Refrigerating equipment*. 2019. No. 12. pp. 34–38. (in Russian)]
- ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. [State standard 30494–2011. Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters. (in Russian)]
- Zheng Yang, Ali Ghahramani, Bercin Becerik-Gerber, Building occupancy diversity and HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) system energy efficiency. *Energy*. 2016. Vol. 109. P. 641–649.
- Peter Smith. BIM & the 5D Project Cost Manager. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 119, P. 475–484.

### Сведения об авторах

#### Муравейников Сергей Сергеевич

К. т. н., доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, mur\_618@mail.ru

#### Сулин Александр Борисович

Д. т. н., профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, miconta@rambler.ru

#### Никитин Андрей Алексеевич

К. т. н., доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, andyquest@mail.ru

#### Макатов Кирилл

Инженер образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, kirmakatov@mail.ru

### Information about authors

#### Muraveinikov Sergei S.

Ph. D., Associate professor of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, mur\_618@mail.ru

#### Sulin Aleksandr B.

D. Sc., Professor of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, miconta@rambler.ru

#### Nikitin Andrey A.

Ph. D., Associate professor of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, andyquest@mail.ru

#### Makatov Kirill

Engineer of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, kirmakatov@mail.ru

