

Поддержание требуемых параметров микроклимата
неотапливаемых частей зданий за счет организации
переточного воздушного отопления

Самвел Володяевич Саргсян, Валерий Юрьевич Кравчук

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Переточное воздушное отопление — редко применяемая, но обладающая существенным экономическим эффектом технология, исследования которой уделяется недостаточно внимания. Предметом исследования являются параметры тепловлажностного состояния воздуха, перетекающего в обслуживаемые помещения. Цель исследования — разработать алгоритм, описывающий изменение состояния воздуха при организации переточного воздушного отопления. Задачи исследования: разработать модель изменения состояния воздуха при организации переточного воздушного отопления; применить разработанную модель и разработать рекомендации по организации переточного воздушного отопления для здания склада.

Материалы и методы. Методика исследования построена на традиционных законах и уравнениях теплообмена, аэродинамики и механики сплошной среды; применении диаграммы состояния влажного воздуха и правилах выполнения построений тепловлажностной обработки воздуха; принципах работы и конструирования вентиляционного оборудования; санитарно-гигиенических основах проектирования вентиляции. Выбор климатических данных, свойств материалов и сред, а также разработка проектных решений проведены в соответствии с актуальной нормативной документацией.

Результаты. Разработан алгоритм, включающий методы и модели и описывающий изменение состояния воздуха при организации переточного воздушного отопления. Создана модель остывания воздуха в неотапливаемом помещении, использующая осредненные характеристики. Выполнена апробация модели на примере здания склада с неотапливаемой частью, в которой подтверждена возможность поддержания требуемых параметров микроклимата за счет работы переточного воздушного отопления. Дополнительно разработаны рекомендации по организации оптимального воздухораспределения и подбору оборудования. Предложен алгоритм, применение которого позволяет выявить пригодность переточного воздушного отопления в промышленных зданиях и рассчитать параметры воздуха.

Выводы. Применение переточного воздушного отопления, рассчитанного по предложенному алгоритму, даст возможность повысить энергетическую эффективность (путем экономии энергоресурсов и снижения капитальных затрат на систему отопления) решений в области вентиляции промышленных зданий. Использование алгоритма подразумевает, что организация переточного воздушного отопления не нарушает технологический процесс и требования к пожарной и санитарно-гигиенической безопасности здания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: воздушное отопление, промышленная вентиляция, энергосбережение, микроклимат, воздухообмен, переток

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саргсян С.В., Кравчук В.Ю. Поддержание требуемых параметров микроклимата неотапливаемых частей зданий за счет организации переточного воздушного отопления // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 9. С. 1433–1443. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1433-1443

Автор, ответственный за переписку: Валерий Юрьевич Кравчук, valerik_kravchuk@mail.ru.

Maintenance of microclimate parameters in unheated parts
of buildings by overflow air heating

Samvel V. Sarsyan, Valeriy Yu. Kravchuk

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Overflow air heating is a rarely used, but possessing a significant economic effect technology, the research of which is given insufficient attention. The subject of the research is the parameters of the thermal and humidity state of the air. The purpose of the research is to develop an algorithm describing the change of air state during the work of overflow air heating. Research objectives: to develop a model of air state change for overflow air heating; to apply the developed model and to formulate the recommendations on the organization of the overflow air heating for the warehouse building.

Materials and methods. The research methodology is based on the traditional laws and equations of heat and mass transfer, aerodynamics and continuum mechanics; application of $I-d$ diagram and the rules of construction of heat and humidity air treatment; principles of operation and design of ventilation equipment; sanitary and hygienic bases of ventilation design. Selection of climatic data, properties of materials, as well as the development of design solutions were carried out in accordance with the current regulatory documentation.

Results. An algorithm including methods and models and describing the change in the state of the air for overflow air heating was developed. A model of air cooling in an unheated room was developed. It was tested on the example of a warehouse building with an unheated part. It confirmed the relevance of the developed model. Additionally, recommendations on the organization of optimal air distribution and selection of equipment were designed.

Conclusions. The application of overflow air heating, calculated according to the proposed algorithm, will make it possible to increase the energy efficiency solutions in the field of ventilation of industrial buildings. The use of the algorithm implies that the organization of overflow air heating does not violate the technological process and requirements for fire and sanitary-hygienic safety of the building.

KEYWORDS: air heating, industrial ventilation, energy saving, microclimate, air exchange, overflow

FOR CITATION: Sarsyan S.V., Kravchuk V.Yu. Maintenance of microclimate parameters in unheated parts of buildings by overflow air heating. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(9):1433-1443. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1433-1443 (rus.).

Corresponding author: Valeriy Yu. Kravchuk, valerik_kravchuk@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Поддержание параметров микроклимата в неотапливаемых частях зданий — нетривиальная задача. Обычно при необходимости соблюдения требований к параметрам воздуха проектировщики предусматривают систему отопления (для поддержания температуры) и системы вентиляции или кондиционирования воздуха (для поддержания температуры, влажности и подвижности воздуха). В ряде случаев можно провести расчетное обоснование возможности поддержания требуемых параметров внутренней среды за счет организации перетока из отапливаемых частей здания в неотапливаемые, обычно это решение имеет существенный экономический эффект. На данный момент в литературе не описаны методы, позволяющие достаточно точно выполнять такой анализ, в данной статье ставится цель устранить эту неопределенность. Технология воздушного отопления широко применяется в промышленных и гражданских зданиях. За рубежом (например, в Канаде) воздушное отопление активно используют для отопления частных жилых домов [1]. В целом область применения воздушного отопления являются помещения большого объема, так как в них необходимо отапливать весь объем, а не только области, расположенные вблизи наружных стен; также такие системы обладают малой инерционностью, что может быть важно для принятия проектных решений. Сфера применения и главные сложности, возникающие при проектировании воздушного отопления, рассмотрены в работах [2, 3]. Ключевые вопросы, решаемые исследователями, это поиск оптимальных способов воздухораспределения [4–6], подбор и компоновка оборудования [7–9], а также некоторые вопросы, касающиеся энергоэффективности таких систем [10–15]. Воздушное отопление в производственных зданиях различного назначения проанализировано в трудах [16–20], однако расчетам и проектированию переточного воздушного отопления внимание до сих пор не уделялось.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование строится на нескольких базовых методах. Важнейшим из них является применение $I-d$ диаграммы влажного воздуха. Использование только формул теплового баланса в данном случае недостаточно, так как по условиям задачи нормируется не только температура воздуха, но и его относительная влажность. Также при охлаждении в неотапливаемой части из воздуха может удаляться не только явная, но и скрытая теплота, что также обуславливает применение графического метода. Обработка воздуха напрямую связана с тепловым балансом неотапливаемой части склада, поэтому для решения задач исследования составляется и решается уравнение баланса энтальпии влажного воздуха. Тепловой баланс, в свою очередь, основан на ряде параметров, характеризующих теплозащитную оболочку здания. Параметры оболочки принимаются по данным проекта, а все вычисления выполняются в соответствии с рекомендациями, приведенными в нормативных документах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработку предлагаемой методики рассмотрим на примере здания склада, содержащего отапливаемую и неотапливаемую части, разделенные внутренней перегородкой (рис. 1). Параметры наружного климата примем следующими: температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 $t_s^{0,92} = -20$ °С, средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца $\varphi_n = 85$ %. Для продукции, хранящейся в отапливаемой части, необходимо поддерживать температуру 15–25 °С, относительную влажность 50–65 %; в неотапливаемой части — температуру –20–40 °С, относительную влажность 30–75 %. Система отопления подобрана исходя из поддержания температуры воздуха, равной +15 °С. Полные тепловыделения от людей, оборудования и освещения составляют 8814 Вт. Влаговыделения от людей — 1035 г/ч.

В отапливаемой части склада организуются однократная приточная вентиляция в объеме $L = 24\,670\text{ м}^3/\text{ч}$. Вытяжка устраивается из верхней зоны неотапливаемой части склада, а между частями воздух перетекает с использованием двух вентиляторов и воздуховодов равномерной раздачи, расположенных вдоль наружных ограждений. Устройство вентиляторов необходимо, так как при организации свободного перетока через проемы из-за неплотностей в ограждающих конструкциях часть воздуха будет «выдавливаться» из отапливаемой части на улицу, а в неотапливаемой части наоборот будет возникать инфильтрация, что снизит энергетическую эффективность решения. Ввиду того, что температура, с которой воздух будет подаваться в неотапливаемую часть, невысока (это показано далее), приточные струи будут обладать слабой неизотермичностью, что избавляет от необходимости проводить трудоемкий расчет воздухо-распределителей и использовать воздухо-распределители, предназначенные для воздушного отопления. Достаточно дать воздух вдоль фасадов здания так, чтобы приточная струя входила в рабочую зону под комфортным для работающего персонала углом. Для качественного проветривания желательно удалять воздух из верхней зоны воздуховодом, проложенным по центральной оси неотапливаемой части склада (рис. 1). Подбор вентиляторов на переточных системах осуществляется на соответствующую долю расхода и аэродинамические потери, которые будут формироваться при этих расходах в воздуховодах переточных систем.

Для начала решим более традиционную задачу построения процессов обработки воздуха в отапливаемой части склада. Начинаем расчет с нанесения на $I-d$ диаграмму влажного воздуха точки наружного воздуха Н и диапазона допустимых параметров внутреннего воздуха (рис. 2). Зона I — для отапливаемой части, зона II — для неотапливаемой. По известным полным теплоизбыткам и влаговыделениям определяем значение коэффициента луча процесса. Проводим луч процесса по касательной слева к зоне допустимых параметров (наиболее экономически целесообразное решение). Так как расход воздуха задается кратностью и зафиксирован, то его ассимилирующая способность тоже неизменна, а значит, можно установить приращение энтальпии между точками П и У (приточный и удаляемый воздух соответственно):

$$G = \frac{3600Q_{\text{пол}}}{I_y - I_{\text{п}}} = \rho L, \text{ кг/ч};$$

$$I_y - I_{\text{п}} = \frac{3600Q_{\text{пол}}}{\rho L} = \frac{3600 \cdot 8,814}{1,22 \cdot 24\,670} = 1,05, \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом, луч процесса представляет собой очень короткий отрезок, длиной 1,05 единиц энтальпии. При подаче воздуха в верхнюю зону помещения точки В и У можно считать совпадающими и располагающимися на пересечении луча процесса и зоны допустимых параметров внутреннего воздуха (рис. 2). Тогда точку П следует искать ниже по лучу процесса на 1,05 единиц энтальпии. Отметим

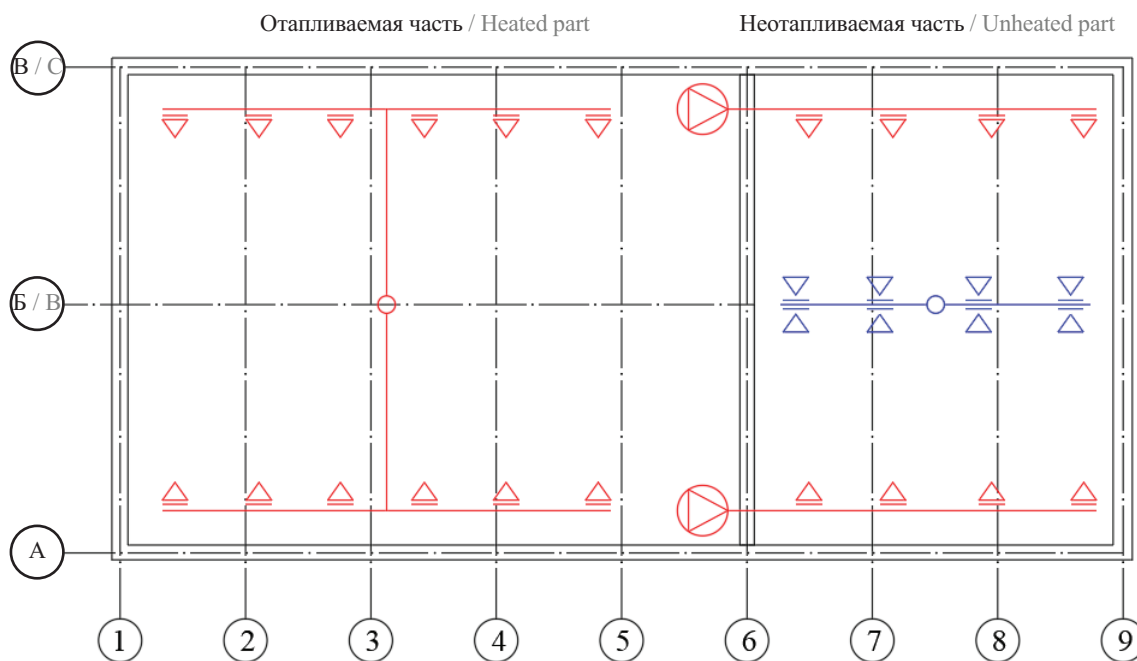


Рис. 1. Планировка склада и принципиальная схема систем вентиляции

Fig. 1. Layout of the warehouse and schematic diagram of the ventilation systems

точку П и определим ее влажность (53 %). Следует заметить, что попасть из точки Н в точку П только нагреванием воздуха невозможно. Для этого необходимо также предусматривать влажностную обработку, предпочтительно с применением изотермического (парового) увлажнения. Проведем изотерму из точки П влево до пересечения с вертикалью, проведенной из точки Н. На пересечении обозначим точку П' (состояние воздуха после вентилятора) и определим ее температуру (14 °С). Проходя через вентилятор, воздух подогревается на 1–4 °С (зависит от температуры, с которой воздух входит, конструкции и режима работы вентилятора и ряда других параметров). Примем в нашем случае 1,5 °С. Тогда перед вентилятором (т.е. после калорифера, точка К) воздух будет иметь температуру 12,5 °С. Отметим эту точку на 1,5 градуса ниже П'.

Процесс обработки приточного воздуха для отопления склада выглядит так:

1) нагревание наружного воздуха калорифером до температуры +12,5 °С;

2) подогрев в вентиляторе на 1,5 °С;

3) изотермическое увлажнение паровым увлажнителем (пар подается в канал после вентилятора на удалении от него в соответствии с монтажной схемой увлажнителя) до относительной влажности 53 %. Увлажнять воздух в этом процессе можно и сильнее вплоть до 70 %. Так или иначе требуемые параметры все равно будут соблюдаться.

В неотапливаемую часть склада воздух поступает в точке У (или В, так как они совпадают), которая уже находится в зоне допустимых параметров, однако при другой схеме воздухораспределения точки могут не совпадать. Тогда точку У следует искать на луче процесса при температуре, определяемой по формуле:

$$t_y = t_b + (H - h_{p.з.}) \text{gradt}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где H — разность высотных отметок между полом и уровнем, с которого воздух забирается в приточный канал, м; $h_{p.з.}$ — высота рабочей (обслуживаемой) зоны, м; gradt — температурный градиент, определяемый по удельной теплонапряженности помещения, °С/м.

Температура воздуха в неотапливаемой части склада, очевидно, будет функцией тепловых потерь:

$$t_x = f(Q_{\text{тп}}),$$

что позволяет разработать модель обменных процессов.

Спрогнозировать состояние воздуха при движении его по неотапливаемой части можно исходя из следующих соображений: из отапливаемой части в неотапливаемую заходит $G = 30\,097$ кг/ч воздуха в состоянии, соответствующем точке У; воздух, двигаясь в неотапливаемой части, отдает явную и скрытую теплоту, соприкасаясь с наружными ограждающими конструкциями, после чего удаляется вытяжной системой. На этом и построим расчетную

модель. Для начала установим коэффициенты теплопередачи поверхностей, через которые теплота будет уходить на улицу. Сопротивление теплопередаче вертикальных и горизонтальных наружных ограждающих конструкций примем по данным проекта. Коэффициенты теплопередачи этих конструкций определим как обратные величины к сопротивлениям (сопротивление пограничных слоев также учитывается). Коэффициенты теплопередачи для I–IV зон пола по грунту примем равными 1/2,1; 1/4,3; 1/8,6; 1/14,2 соответственно. Площади каждого из элементов теплозащитной оболочки здания вычислим по чертежам. Средний коэффициент теплопередачи конструкций определим как средний по площади:

$$K_{\text{ср}} = \frac{K_1 A_1 + K_2 A_2 + \dots + K_i A_i + \dots + K_n A_n}{\sum_{i=1}^n A_i} = 0,31, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Тепловой баланс неотапливаемой части выглядит так: воздух, поступающий в неотапливаемую часть, является потоком энтальпии, который обозначим как H_1 ; этот поток, вследствие теплопотерь через наружные стены, утрачивает мощность, которую обозначим Q ; выходящий из неотапливаемой части воздух — это поток энтальпии, обозначим H_2 . В математическом выражении это запишется так:

$$H_1 - Q = H_2, \text{ Вт},$$

где $H_1 = G \cdot C \cdot t_n$ (C — теплоемкость воздуха, равная 1005 Дж/(кг·К)); $Q = K_{\text{ср}} \cdot A^* \cdot (t_{b2} - t_5^{0,92})$; (A^* — суммарная площадь всех ограждающих конструкций, м²; t_{b2} — средняя температура воздуха внутри неотапливаемой части, °С, $t_{b2} = (t_n + t_{y2})/2$; t_n — температура приточного воздуха, поступающего из отапливаемой части, равная 14 °С); $H_2 = G \cdot C \cdot t_{y2}$ (t_{y2} — температура воздуха на выходе из неотапливаемой части, °С).

Подставляем в уравнение тепловых балансов:

$$G \cdot C \cdot t_n - K_{\text{ср}} \cdot A^* \cdot ((t_n + t_{y2})/2 - t_5^{0,92}) = G \cdot C \cdot t_{y2}.$$

Учитывая схему воздухораспределения (удаление производится из верхней зоны), можно с достаточной точностью принять, что $t_{b2} = t_{y2}$, тогда уравнение тепловых балансов примет более простой вид:

$$G \cdot C \cdot t_n - K_{\text{ср}} \cdot A^* \cdot (t_{y2} - t_5^{0,92}) = G \cdot C \cdot t_{y2}.$$

При необходимости также можно учесть добавочные тепловые потери, характеризуемые коэффициентом β , и затраты на нагрев инфильтрующегося воздуха. В этом случае теплопотери Q будут складываться из двух слагаемых:

$$\sum Q_i^{\text{в}} = K \Delta t (1 + \sum \beta) n;$$

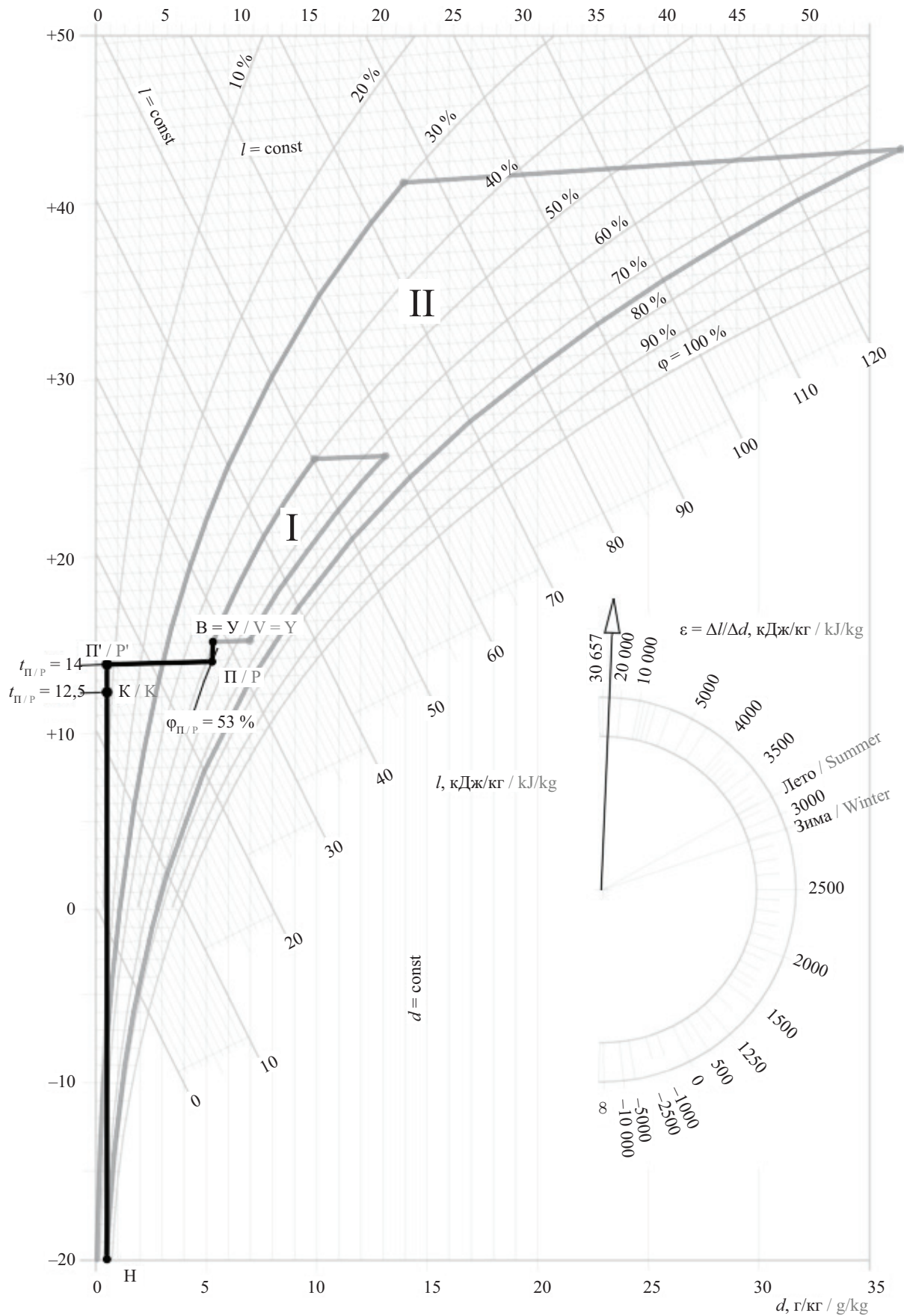


Рис. 2. Процесс обработки воздуха в холодный период года в отапливаемой части

Fig. 2. The process of air treatment in the cold season in the heated part

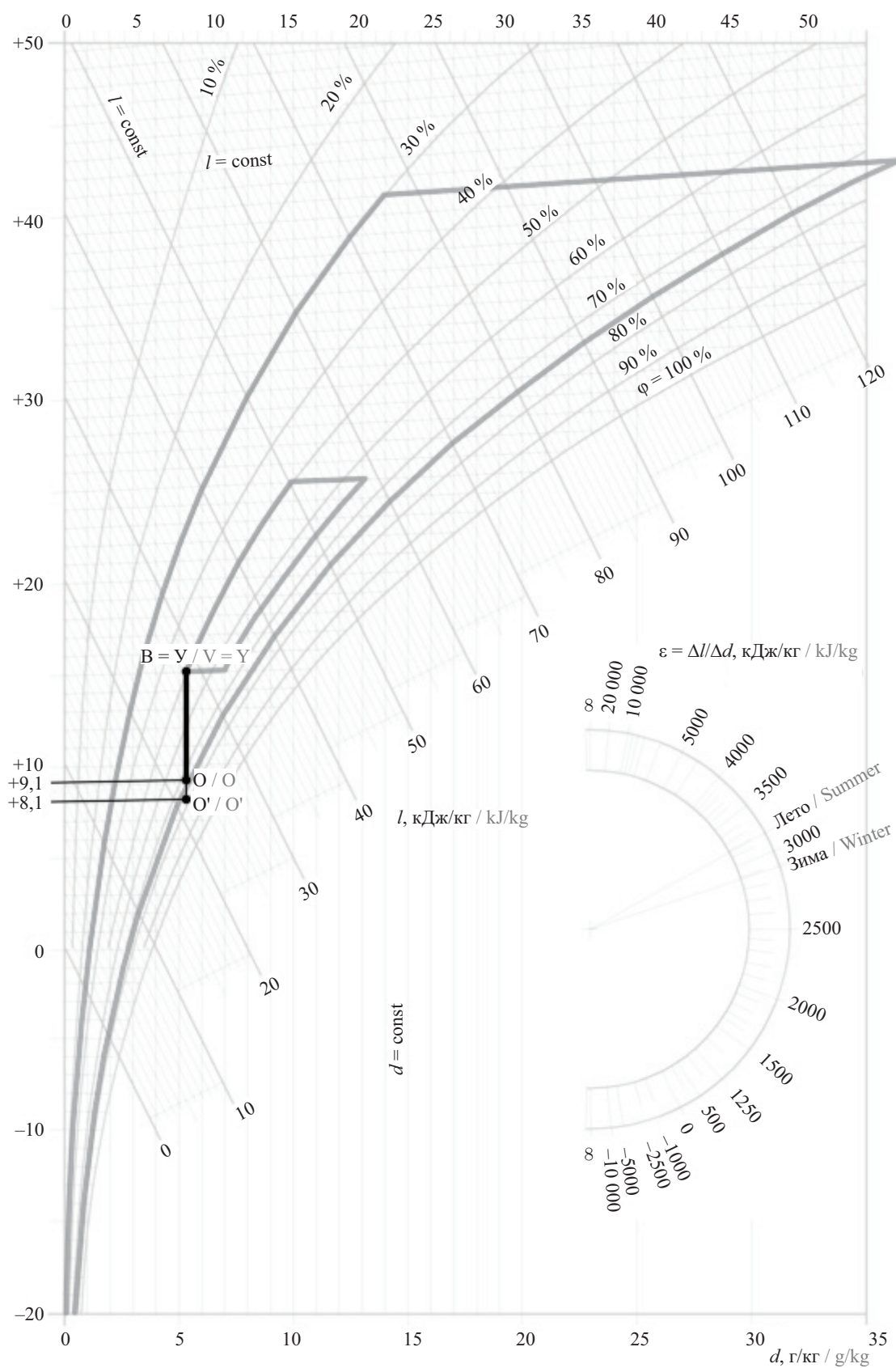


Рис. 3. Схема обработки воздуха при его движении внутри неотапливаемой части здания
Fig. 3. Scheme of air treatment during its movement inside the unheated part of the building

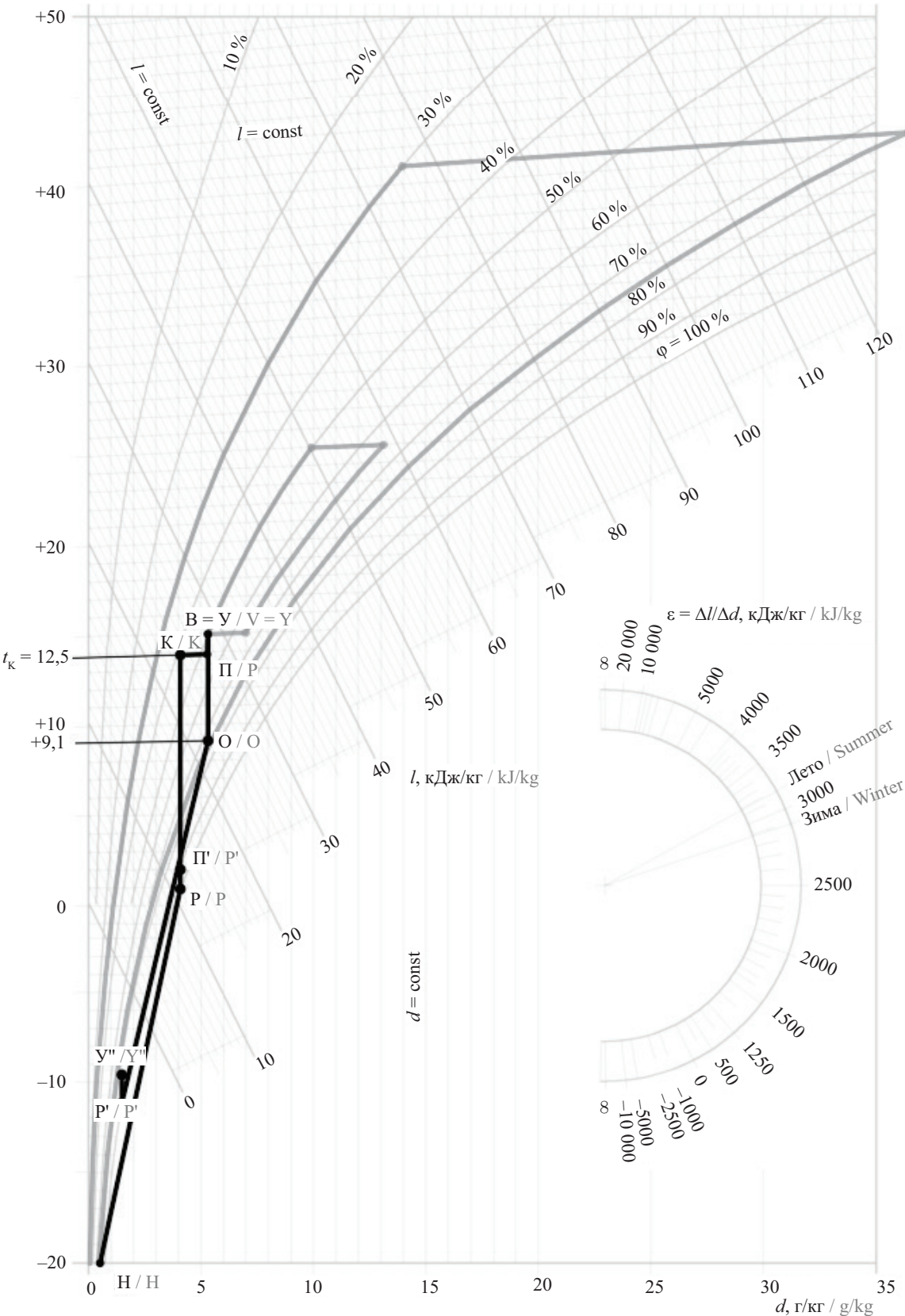


Рис. 4. Схема обработки воздуха при его движении внутри обеих частей здания при использовании роторного регенератора

Fig. 4. Scheme of air treatment during its movement inside both parts of the building when using a rotary regenerator

$$\sum Q^{inf(t_a - t_x)}.$$

Выражаем t_{y2} :

$$t_{y2} = \frac{t_n \cdot (2 - a) + 2a \cdot t_s^{0,92}}{a + 2} = 9,1, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $a = K_{cp} \cdot A^*/(G \cdot C)$.

Средняя температура внутри неотапливаемой части составит:

$$t_{n2} = t_{y2} = 9,1, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Чтобы определить относительную влажность воздуха необходимо изобразить процесс охлаждения на $I-d$ диаграмме. Построение начнем с точки У. Так как в процессе охлаждения (предположительно) будет теряться не только явная, но и скрытая теплота, то для определения положения точки В₂ (состояние внутреннего воздуха в неотапливаемой части) следует точку У соединить с точкой О', температура которой равна температуре поверхности ограждающих конструкций, а относительная влажность равна 100 %. Среднюю температуру поверхностей ограждающих конструкций определим по формуле:

$$t_{пов} = t_s^{0,92} + K_{cp} \left(\frac{1}{K_{cp}} - \frac{1}{8,7} \right) \cdot (t_{n2} - t_s^{0,92}) = 8,1, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Так как 8,1 °С — это значение, превышающее температуру точки росы для воздуха в состоянии У, то процесс охлаждения будет «сухим», а точка О' будет иметь влажность менее 100 %. Она будет располагаться под точкой У и иметь температуру 8,1 °С. Точка О' является условным окончанием процесса охлаждения, а точка У — его началом. После построения обеих точек соединяем их. В нашем случае процесс идет не до точки О', а до точки О, имеющей ранее вычисленную температуру 9,1 °С. По этой температуре ее и следует найти на линии У–О'. Относительная влажность точки О составит 73 %, что

соответствует допустимому диапазону. Построение приведено на рис. 3.

Важно заметить, что данный расчет выполнен по осредненным характеристикам, т.е. для помещения «в среднем». В реальности в различных точках помещения параметры микроклимата отличаются и вблизи ограждающих конструкций температура воздуха будет близка к 8,1 °С, а влажность к 80 % (соответствует точке О'). Тем не менее даже в этом случае требования к микроклимату в рабочей зоне нарушены не будут.

При использовании установки с роторным регенератором процессы обработки будут выглядеть так, как показано на рис. 4. В этом случае вытяжной воздух О будет забираться в роторный регенератор и отдавать часть своей теплоты и влаги приточному воздуху.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках статьи рассмотрен конкретный пример и разработаны рекомендации по организации переточного воздушного отопления с целью экономии тепловой энергии при поддержании требуемых параметров микроклимата в отапливаемой и неотапливаемой частях промышленного здания. Предложена модель, позволяющая выполнить необходимые расчеты для решения этой задачи, рассмотрено применение роторного рекуператора для целей теплоутилизации.

Перспективой исследований в данной области может быть изучение случаев, в которых применяются другие схемы воздухораспределения; воздух теряет не только явную, но и скрытую теплоту; используются другие виды теплоутилизационного оборудования (пластинчатые или энтальпийные рекуператоры, теплоутилизация с применением промежуточного теплоносителя и др.). Также интерес представляют обзорные статьи, содержащие информацию об анализе допустимости применения рассмотренной технологии в зданиях с различным технологическим процессом, архитектурой, регионом строительства и применяемым вентиляционным оборудованием.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лосев Д. Воздушное отопление // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2010. № 8 (104). С. 64–67. EDN RFTFOJ.
2. Лосев Д.П. Все о воздушном отоплении // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2013. № 3 (135). С. 68–71. EDN RINWEZ.
3. Лосев Д.П. Все о воздушном отоплении // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2010. № 7 (103). С. 50–52. EDN RFOBFR.
4. Вишневский Е.П., Степанов А.Н. Воздушное отопление логистических центров // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2013. № 2 (134). С. 70–75. EDN PQHWPZ.
5. Белугин А.С., Чесноков Б.П., Наумова О.В. Особенности организации подачи воздуха при устройстве воздушного отопления, совмещенного с вентиляцией // Проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспе-

чения : мат. VIII Нац. конф. с междунар. участием. 2018. С. 40–43. EDN YWNICD.

6. *Kindaichi S., Kindaichi T.* Indoor thermal environment and energy performance in a central air heating system using a heat pump for a house with underfloor space for heat distribution // *Building Services Engineering Research and Technology*. 2022. Vol. 43. Issue 6. Pp. 755–766. DOI: 10.1177/01436244221117356

7. *Новгородский Е.Е., Василенко А.И.* Энергетическая эффективность компоновочных решений систем воздушного отопления // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2004. № 1. С. 37–39. EDN JVCNPJ.

8. *Белугин А.С., Чесноков Б.П., Наумова О.В.* Анализ типов воздухонагревателей для систем воздушного отопления // *Наука и образование: новое время*. 2018. № 5 (28). С. 26–29. EDN YOBQMX.

9. *Satpati B., Alam Md.A., Datta S., Koley C.* Modelling simulation and validation of duct air heating system // *2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*. 2013. DOI: 10.1109/CCA.2013.6662892

10. *Сериков С.В., Ильина Т.Н.* Утилизация тепла уходящих газов котельной установки в системе воздушного отопления // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2013. № 4. С. 53–55. EDN QCEJRB.

11. *Бельмаз Д.Н.* Способ использования вторичной теплоты продуктов переработки нефти в воздушном отоплении зданий // *Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвящ. 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова*. 2013. С. 74–79. EDN SHNSSZ.

12. *Васильев И.И., Каменева К.И.* Воздушное отопление с рекуперацией тепла в условиях Крайнего Севера // *Управление инновациями: теория, методология, практика*. 2014. № 11. С. 93–96. EDN SZTQBP.

13. *Liu J., Lu Y., Tian X., Lin Z.* Analyses of yearly performance dual-temperature warm air heating system applied in different climates // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 194. P. 117076. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117076

14. *Киборт И.Д., Кошкарев А.Ю.* Энергоэффективная система воздушного отопления подсобных помещений котельной // *Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : мат. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, посвящ. 50-летию создания Тюменского индустриального института*. 2013. С. 134–137. EDN SBMMYH.

15. *Liu J., Tian X., Lin Z.* Performance analysis of a novel dual heat source warm air heating system with ecofriendly refrigerants // *Building and Environment*. 2021. Vol. 194. P. 107679. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107679

16. *Саулина Т.А., Семикова Е.Н.* Оценка эффективности использования воздушной системы отопления в производственных зданиях // *VII Всерос. фестиваль науки : сб. докл. в 2 т. Т. 1*. 2017. С. 303–306. EDN ZVTWLV.

17. *Винокуров К.В., Бедило П.С.* Применение энергосберегающих технологий при проектировании воздушного отопления производственных зданий на мукомольных и крупяных предприятиях // *Территория инноваций*. 2018. № 12 (28). С. 20–24. EDN YTYDBJ.

18. *Иванов К.В.* Технологии воздушного отопления в зданиях сельскохозяйственного назначения // *Вестник науки*. 2018. Т. 4. № 7 (7). С. 114–120. EDN YLRETZ.

19. *Ahmed K., Sistonen E., Simson R., Kurnitski J., Kesti J., Lautso P.* Radiant panel and air heating performance in large industrial buildings // *Building Simulation*. 2018. Vol. 11. Issue 2. Pp. 293–303. DOI: 10.1007/s12273-017-0414-8

20. *Баканова С.В., Ониани В.Т.* Отопление зданий предприятий торговли и бытового обслуживания с помощью систем воздушного отопления // *Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах : сб. ст. XIX Междунар. науч.-практ. конф.* 2018. С. 44–47. EDN XYOEDJ.

Поступила в редакцию 9 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 20 июня 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Самвел Володяевич Саргсян** — кандидат технических наук, доцент, директор НОЦ «Теплогасоснабжение и вентиляция»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 429896; SargsyanSV@mgsu.ru;

Валерий Юрьевич Кравчук — преподаватель кафедры теплогасоснабжения и вентиляции; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 804603; valerik_kravchuk@mail.ru.

Вклад авторов:

Саргсян С.В. — научное руководство, концепция исследования, разработка модели и алгоритма, редактирование текста.

Крачук В.Ю. — написание исходного текста, итоговые выводы, разработка модели и алгоритма.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Losev D. Air heating. *Plumbing, Heating, Air conditioning*. 2010; 8(104):64-67. EDN RFTFOJ. (rus.).
2. Losev D.P. All about air heating. *Plumbing, Heating, Air conditioning*. 2013; 3(135):68-71. EDN RINWEZ. (rus.).
3. Losev D.P. All about air heating. *Plumbing, Heating, Air conditioning*. 2010; 7(103):50-52. EDN RFOBFR. (rus.).
4. Vishnevsky E.P., Stepanov A.N. Air heating of logistic centers. *Plumbing, Heating, Air conditioning*. 2013; 2(134):70-75. EDN PQHWPZ. (rus.).
5. Belugin A.S., Chesnokov B.P., Naumova O.V. Features of the organization of air supply in the device of air heating combined with ventilation. *Problems and prospects for the development of construction, heat and gas supply and energy supply : materials of the VIII National conference with international participation*. 2018; 40-43. EDN YWNICD. (rus.).
6. Kindaichi S., Kindaichi T. Indoor thermal environment and energy performance in a central air heating system using a heat pump for a house with underfloor space for heat distribution. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2022; 43(6):755-766. DOI: 10.1177/01436244221117356
7. Novgorodsky E.E., Vasilenko A.I. Energy efficiency of layout solutions for air heating systems. *Energy Saving and Water Treatment*. 2004; 1:37-39. EDN JVCPNJ. (rus.).
8. Belugin A.S., Chesnokov B.P., Naumova O.V. Analysis of types of air heaters for air heating systems. *Science and Education: New Time*. 2018; 5(28):26-29. EDN YOBQMX. (rus.).
9. Satpati B., Alam Md.A., Datta S., Koley C. Modelling simulation and validation of duct air heating system. *2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*. 2013. DOI: 10.1109/CCA.2013.6662892
10. Serikov S.V., Ilyina T.N. Utilization of waste heat from a boiler installation in an air heating system. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013; 4:53-55. EDN QCEJRB. (rus.).
11. Belmaz D.N. The method of using the secondary heat of oil refining products in the air heating of buildings. *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of the Belarusian State Technical University. V.G. Shukhov, dedicated to the 160th anniversary of the birth of V.G. Shukhov*. 2013; 74-79. EDN SHNSSZ. (rus.).
12. Vasiliev I.I., Kameneva K.I. Air heating with heat recovery in the conditions of the Far North. *Management of innovations: theory, methodology, practice*. 2014; 11:93-96. EDN SZTQBP. (rus.).
13. Liu J., Lu Y., Tian X., Lin Z. Analyses of yearly performance dual-temperature warm air heating system applied in different climates. *Applied Thermal Engineering*. 2021; 194:117076. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117076
14. Kibort I.D., Koshkarev A.Yu. Energy-efficient air heating system for utility rooms of the boiler room. *Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex: materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students, young scientists and specialists dedicated to the 50th anniversary of the Tyumen Industrial Institute*. 2013; 134-137. EDN SBMMYH. (rus.).
15. Liu J., Tian X., Lin Z. Performance analysis of a novel dual heat source warm air heating system with ecofriendly refrigerants. *Building and Environment*. 2021; 194:107679. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107679
16. Saulina T.A., Semikova E.N. Evaluation of the effectiveness of the use of an air heating system in industrial buildings. *VII All-Russian Festival of Science: a collection of reports : in 2 volumes. Volume 1*. 2017; 303-306. EDN ZVTWLV. (rus.).
17. Vinokourov K.V., Bedilo P.S. The use of energy-saving technologies in the design of air heating of industrial buildings in the milling and cereal enterprises. *Territory of Innovations*. 2018; 12(28):20-24. EDN YTYDBJ. (rus.).
18. Ivanov K.V. Air heating technologies in agricultural buildings. *Vestnik nauki*. 2018; 4(7):114-120. EDN YLRETZ. (rus.).
19. Ahmed K., Sistonen E., Simson R., Kurnitski J., Kesti J., Lautso P. Radiant panel and air heating performance in large industrial buildings. *Building Simulation*. 2018; 11(2):293-303. DOI: 10.1007/s12273-017-0414-8
20. Bakanova S.V., Oniani V.T. Heating of buildings of trade and consumer services using air heating systems. *Problems of energy saving in the industrial and housing and communal sectors: collection of articles of the XIX International Scientific and Practical Conference*. 2018; 44-47. EDN XYOEDJ. (rus.).

Received March 9, 2023.

Adopted in revised form on June 20, 2023.

Approved for publication on June 20, 2023.

B I O N O T E S : **Samvel V. Sargsyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head Director of the Scientific and Educational Center “Heat and Gas Supply and Ventilation”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 429896; SargsyanSV@mgsu.ru;

Valeriy Yu. Kravchuk — lecturer of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 804603; valerik_kravchuk@mail.ru.

Contribution of the authors:

Samvel V. Sargsyan — scientific guidance, research concept, model and algorithm development, text review.

Valeriy Yu. Kravchuk — writing the source text, final conclusions, development of the model and algorithm.

The authors declare that there is no conflict of interest.