

Применение пластинчатых рекуператоров в схеме «свободного охлаждения» для ассимиляции теплоизбытков в помещении

Рецензия эксперта на статью получена
15.03.2026 [The expert review of the article
was received on Mart 15, 2026]

Энергосбережение при поддержании необходимой совокупности внутренних климатических параметров в помещении, требуемой исходя из условий комфортности либо для технологических нужд, всегда является актуальным вследствие значительных энергозатрат при работе систем обеспечения микроклимата и их существенной доли в общем энергетическом балансе зданий, в первую очередь общественных и промышленных. Особенно это важно в настоящее время, в условиях действия Федерального закона №261-ФЗ [1]. Поэтому представляют интерес любые инженерные решения, позволяющие сократить расход материальных и энергетических ресурсов на обеспечение внутреннего микроклимата, особенно если они не сопровождаются значительными капитальными вложениями и с экономической точки зрения оказываются мало затратными и быстрокупаемыми.

Одной из таких энергосберегающих технологий является «свободное охлаждение» [2–6], применяемое в холодный и переходный периоды года и позволяющее воспользоваться низкими температурами наружного воздуха для отвода теплоты от хладоносителя, обслуживающего воздухоохладители местных систем охлаждения (МСО) помещений. Чтобы реализовать подобную схему, необходимо направить хладоноситель вместо испарителя холодильной машины (чиллера) во внешний теплообменник, который, как правило, устанавливается на наружной стене (фасаде) здания. Это позволяет достичь уменьшения энергозатрат на подготовку притока в МСО, поскольку уже не требуется расходовать электроэнергию на привод компрессора.

В данном случае считается, что теплоизбытки в обслуживаемом помещении, которые даже в течение отопительного периода во многих общественных и промышленных зданиях имеют место и при полностью закрытых автоматических терморегуляторах систем отопления вследствие превышения теплопоступлений над теплопотерями, ассимилируются в первую очередь с помощью МСО, у которых появляется дополнительный конструктивный элемент — внешний теплообменник с соответствующим циркуляционным контуром (рис. 1а). Поэтому обычно предполагается, что подобная схема наиболее целесообразна в помещениях с большими избытками явной теплоты и значительной теплонапряжённостью, например, в центрах обработки данных [7–9].

Следует, однако, заметить, что «свободное охлаждение» не является единственным вариантом снижения энергопотребления на климатизацию зданий в зимнем режиме. В частности, автором в работе [10] показано, что при определённых условиях в это время можно вообще обойтись без работы МСО, если дополнительно понизить температуру притока общеобменной системы механической вентиляции или центрального кондиционирования воздуха.

В некотором смысле это даёт ещё более существенное снижение энергопотребления за счёт сокращения расхода теплоты на подогрев притока, который в любом варианте необходим для обеспечения санитарно-гигиенических требований к качеству внутреннего воздуха.

Однако такое решение возможно не всегда, поскольку при малых расходах могут не соблюдаться ограничения, накла-

УДК 697:1. Научная специальность: 2.1.3.

Применение пластинчатых рекуператоров в схеме «свободного охлаждения» для ассимиляции теплоизбытков в помещении

Олег Дмитриевич Самарин, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Рассмотрена модификация энергосберегающей схемы системы местно-центрального кондиционирования воздуха с применением «свободного охлаждения» в холодный и переходный периоды года за счёт замены внешнего теплообменника и обслуживающего его циркуляционного контура для хладоносителя на расположенный в помещении пластинчатый перекрёстноточный рекуператор, позволяющий непосредственно охлаждать внутренний воздух помещения. Проведены расчёты параметров приточной струи, образуемой воздухом, охлаждённым в данном рекуператоре, для точки её входа в обслуживаемую зону характерного помещения-представителя, и выполнена проверка допустимости отклонений этих параметров от принятых в целом для обслуживаемой зоны с точки зрения обеспечения условий комфортности. По результатам расчётов сделан вывод о целесообразности предлагаемой схемы для помещений большой высоты при её использовании с сетью потолочных диффузоров, а для низких помещений — с установкой диффузора за выхлопом для уменьшения начальной скорости струи.

Ключевые слова: энергосбережение, кондиционирование воздуха, «свободное охлаждение», перекрёстноточный рекуператор, приточная струя, климатический комфорт.

UDC 697:1. Scientific specialty number: 2.1.3.

The use of plate heat exchangers in the “free cooling” scheme for the assimilation of heat surpluses in the room

Oleg D. Samarin, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSEU)

The modification of the energy-saving scheme of the local central air conditioning system with the use of “free cooling” during the cold and transitional periods of the year is considered by replacing the external heat exchanger and the circulating circuit for the coolant serving it with a plate cross-flow recuperator located in the room, which allows direct cooling of the indoor air. Calculations of the parameters of the supply jet formed by the air cooled in this recuperator have been carried out for the point of its entry into the serviced area of a typical representative room, and the tolerance of deviations of these parameters from those generally accepted for the serviced area has been checked in terms of ensuring comfort conditions. Based on the calculation results, it is concluded that the proposed scheme is appropriate for high-altitude rooms when used with a network of ceiling diffusers, and for low rooms with the installation of a diffuser behind the exhaust to reduce the initial jet velocity.

Key words: energy saving, air conditioning, “free cooling”, cross-flow recuperator, supply jet, climatic comfort.

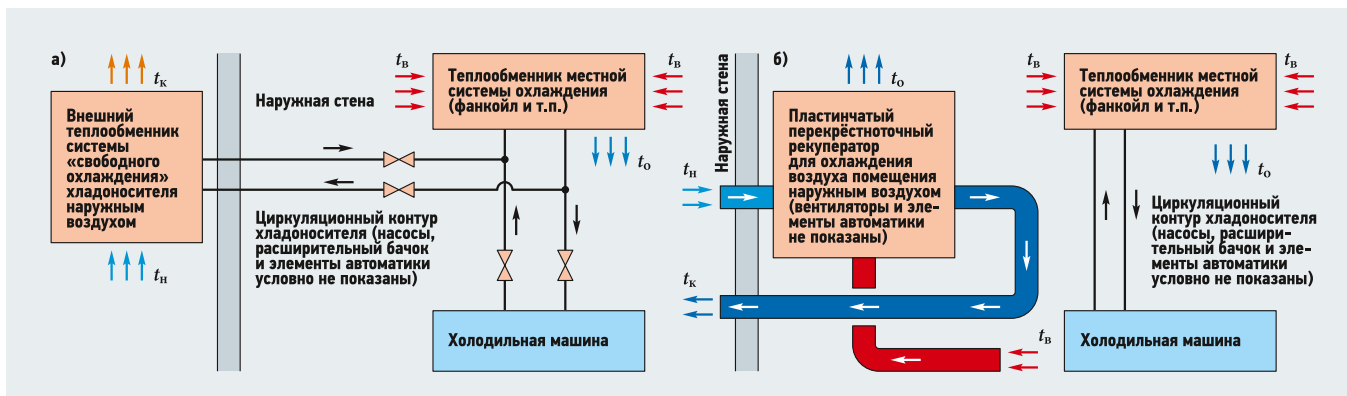


Рис. 1. Существующая (а) и предлагаемая (б) схемы местной системы охлаждения помещений, использующая «свободное охлаждение» хладагителя [$t_{\text{в}}$ — температура внутреннего воздуха в помещении, °C; $t_{\text{о}}$ — температура охлажденного воздуха, подаваемого в помещение аппаратом МСО, °C; $t_{\text{н}}$ — температура наружного воздуха, охлаждающего внешний теплообменник, °C; $t_{\text{к}}$ — температура наружного воздуха, нагретого во внешнем теплообменнике, °C]

дываемые действующими нормативными документами, в первую очередь СП 60.13330.2020 [11] (далее — СП 60), на параметры приточной струи в точке её входа в обслуживаемую зону помещения, особенно с учётом того обстоятельства, что в процессе автоматического регулирования текущая температура притока может оказаться ниже расчётной [12].

Поэтому можно предложить иной вариант схемы местного охлаждения, когда воздух МСО готовится в перекрёстном теплообменнике с непосредственной передачей теплоты потоку наружного холодного воздуха, забираемого через проём в наружной стене и затем возвращаемого обратно (рис. 1б).

Использование в предлагаемой схеме именно пластинчатого рекуператора обусловлено компоновочными преимуществами, поскольку данная конструкция позволяет непосредственно охладить внутренний воздух и подать его в помещение без использования дополнительного циркуляционного контура, который присутствовал бы в схеме с промежуточным теплоносителем, которая, таким образом, не дала бы упрощений по сравнению с существующим вариантом.

Также это вызвано и соображениями комфортности, которые делают нецелесообразным установку роторного регенеративного теплообменника из-за его высокой температурной эффективности, вследствие чего охлаждённый в таком аппарате воздух имел бы слишком низкую температуру для непосредственной подачи в помещение, а кроме того, при этом не исключается частичное проникновение в помещение необработанного наружного воздуха.

Рассмотрим оценку возможности применения предлагаемой схемы с точки зрения выполнения санитарно-гигиенических требований и обеспечения комфортности для характерного помещения в общественном здании.

В качестве исходных данных примем следующие параметры: высота помещения $H_{\text{пом}} = 10,8$ м (по разрезу здания); высота рабочей зоны $h_{\text{рз}} = 1,5$ м (поскольку люди в помещении сидят); площадь пола $A_{\text{пл}} = 15,2 \times 9,9 = 150$ м² (по плану этажа); избытки явной теплоты составят $Q_{\text{изб.я}} = 50 A_{\text{пл}} = 50 \times 150 = 7500$ Вт. Будем считать, что вся $Q_{\text{изб.я}}$ ассимилируется за счёт МСО, а если это не так, получаемая оценка будет давать запас. Принимаем $t_{\text{в}} = 21$ °C, тогда для воздуха, подаваемого системой, можно допустить, что $t_{\text{о}} = t_{\text{в}} - 6 = 15$ °C.

Массовый расход воздуха в системе будет равен (Приложение Г СП 60 [11], с учётом принятых выше обозначений):

$$G = \frac{3,6 Q_{\text{изб.я}}}{c_{\text{в}}(t_{\text{в}} - t_{\text{п}})} = \frac{3,6 \times 7500}{1,005 \times (21 - 15)} \approx 4478 \text{ кг/ч,}$$

где $c_{\text{в}}$ — удельная массовая теплоёмкость воздуха, $c_{\text{в}} = 1,005$ кДж/(кг·К). Отсюда требуемая объёмная воздухопроизводительность системы:

$$L = G/\rho = 4478/1,23 = 3640 \text{ м}^3/\text{ч,}$$

где $\rho = 1,23$ кг/м³ — плотность воздуха при температуре $t_{\text{о}}$. Предусматриваем подачу воздуха веерными струями через регулируемые многориффовые плафоны квадратного сечения. Из конструктивных соображений принимаем их количество $N = 4$ (в два ряда). Это будет подтверждено дальнейшим расчётом с использованием методики [13] и частично Приложение Ж СП 60 [11].

Потолок помещения разбиваем на прямоугольные ячейки, в центре каждой из которых размещается воздухораспределитель. Длина ячейки равна $15,2/2 = 7,6$ м, ширина — $9,9/2 = 4,95$ м. Поэтому за расчётную ширину ячейки B принимаем меньшую из этих величин, то есть 4,95 м.

Расчётная длина струи:

$$x = B/2 + (H_{\text{пом}} - h_{\text{рз}} - 0,5) = 4,95/2 + (10,8 - 1,5 - 0,5) = 11,28 \text{ м,}$$

здесь 0,5 м — расстояние по высоте от потолка до воздуховыпускного сечения воздухораспределителя.

Расход воздуха на один воздухораспределитель: $L_{\text{o}} = L/N = 3640/4 = 910$ м³/ч. Принимаем рекомендуемую скорость воздуха в живом сечении $v_{\text{ор}} = 3$ м/с, так как высота помещения $H_{\text{пом}} > 6$ м.

Ориентировочное живое сечение для прохода воздуха:

$$A_{\text{ор}} = \frac{L_{\text{o}}}{3600 v_{\text{ор}}} = \frac{910}{3600 \times 3} = 0,084 \text{ м}^2.$$

Выбираем плафоны «Арктос» марки 4АПН 450 × 450. Их характеристики: фактическое живое сечение $A_{\text{факт}} = 0,083$ м² — по каталогу; скоростной и температурный коэффициенты $m = 2,5$ и $n = 3$ по табл. 17.6 [13].

Фактическая скорость на выпуске:

$$v_{\text{ор}} = \frac{L_{\text{o}}}{3600 A_{\text{факт}}} = \frac{910}{3600 \times 0,083} = 3,05 \text{ м/с.}$$

Величина начальной избыточной температуры в струе $\Delta t_{\text{o}} = t_{\text{в}} - t_{\text{o}} = 6$ °C (см. выше).

Геометрическая характеристика струи:

$$H = \frac{5,45 m v_{\text{ор}} \sqrt[4]{A_{\text{факт}}}}{\sqrt{n \Delta t_{\text{o}}}} = \frac{5,45 \times 2,5 \times 3,05 \times \sqrt[4]{0,083}}{\sqrt{3 \times 6}} = 5,25 \text{ м.}$$

Коэффициент неизотермичности:

$$k_n = \sqrt[3]{1 + 2 \left(\frac{x}{H} \right)} = \sqrt[3]{1 + 2 \times \left(\frac{11,28}{5,25} \right)} = 2,17.$$

Принимаем под корнем знак «плюс», поскольку температура притока в холодный период ниже температуры внутреннего воздуха, а подача осуществляется сверху вниз. Коэффициент стеснения $k_{\text{кон}}$ в данном случае можно считать равным 1,0.

Скорость на оси струи в точке её входа в рабочую зону:

$$v_x = \frac{m v_{\text{o}} \sqrt{A_{\text{факт}}}}{x} k_n k_{\text{кон}} = \frac{2,5 \times 3,05 \times \sqrt{0,083}}{11,28} \times 2,17 \times 1,0 = 0,42 \text{ м/с.}$$

Это совпадает с допустимым уровнем $v_{\text{доп}} = 0,3 \times 1,4 = 0,42$ м/с. Здесь $v_{\text{норм}} = 0,3$ м/с — допустимое значение подвижности воздуха для холодного периода в целом по рабочей зоне по ГОСТ 30494 [14] (считаем, что возможность применения допустимого $v_{\text{норм}}$, а не оптимального, установлена заданием на проектирование в соответствии с п. 5.3 СП 60 [11]); 1,4 — повышающий коэффициент для перехода от $v_{\text{норм}}$ к $v_{\text{доп}}$ при допустимых условиях по Приложению Д СП 60 [11], когда струя входит в рабочую зону основным участком. В нашем примере длина начального участка равна:

$$m\sqrt{A_{\text{факт}}} = 2,5 \times \sqrt{0,083} = 0,72 \text{ м} \ll x = 11,28 \text{ м},$$

следовательно, струя входит в рабочую зону действительно основным участком.

Отклонение температуры в струе от температуры в рабочей зоне в точке входа в неё струи:

$$\begin{aligned} \Delta t_x &= \frac{n\Delta t_0 \sqrt{A_{\text{факт}}}}{x} \frac{1}{k_n k_{\text{кон}}} = \\ &= \frac{3 \times 6 \times \sqrt{0,083}}{11,28} \times \frac{1,0}{2,17 \times 1,0} = \\ &= 0,21^\circ\text{C} < \Delta t_{\text{доп}} = \Delta t_2 = 1,5^\circ\text{C} \end{aligned}$$

(по Приложению Д СП 60 [11] для жилых, общественных и административно-бытовых зданий, если $t_0 < t_{\text{в}}$).

Проверяем условие прилипания струи $B/2 < 0,4H$: $4,95/2 = 2,47 > 0,4 \times 5,25 = 2,1$ — условие безотрывного течения струи формально не выполнено, однако невыполнение не слишком значительно (находится в пределах точности расчёта), следовательно, выбранный тип воздухораспределительного устройства и схема их размещения обеспечивают нормируемые параметры воздуха в обслуживаемой зоне.

Если выхлоп охлаждённого в установке воздуха осуществляется непосредственно из вентиляторного блока вверх в помещение, тогда:

$$\begin{aligned} x &= 2B + 2(H_{\text{пом}} - h_{\text{рз}}) = \\ &= 2 \times 4,95 + 2 \times (10,8 - 1,5) = 28,5 \text{ м}. \end{aligned}$$

Для $L = 3640$ м³/ч и при статическом давлении, близком к нулю при работе вентилятора без сети, необходимый диаметр рабочего колеса вентилятора составляет около 225 мм, следовательно, сторона выхлопного отверстия равна $0,8 \times 225 = 180$ мм = 0,18 м, тогда $A_{\text{факт}} = 0,182 = 0,0324$ м², откуда имеем:

1. Скорость на выпуске:

$$v_0 = 3640 / (3600 \times 0,0324) = 31,2 \text{ м/с},$$

$m = 6,8$, $n = 5,1$ (для открытого отверстия).

2. Геометрическая характеристика:

$$H = \frac{5,45 \times 6,8 \times 31,2 \times \sqrt[4]{0,0324}}{\sqrt{5,1 \times 6}} = 88,6 \text{ м}.$$

3. Коэффициент неизотермичности, как и коэффициент стеснения $k_{\text{соп}}$, в данном случае можно считать также равным 1,0, потому что струя одинаковую часть пути движется и вверх, и вниз.

4. Скорость на оси струи в точке её входа в рабочую зону:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{6,8 \times 31,2 \times \sqrt{0,0324}}{28,5} \times 1,0 \times 1,0 = \\ &= 1,34 \text{ м/с} \gg v_{\text{доп}} = 0,42 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

5. Избыточная температура:

$$\begin{aligned} \Delta t_x &= \frac{5,1 \times 6 \times \sqrt{0,0324}}{28,5} \frac{1,0}{1,0 \times 1,0} = \\ &= 0,19^\circ\text{C} < \Delta t_{\text{доп}} = \Delta t_2 = 1,5^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Проверяем условие прилипания струи $2B < 0,5H$ (имея в виду, что нас интересует безотрывное течение только вдоль потолка, а вдоль стен оно обеспечивается автоматически):

$$2 \times 4,95 \ll 0,5 \times 88,6 = 44,3 \text{ м},$$

то есть условие выполняется.

Таким образом, существенно не соблюдается условие по v_x . Однако, если за выхлопным отверстием установить диффузор с шириной на выходе, равной 0,54 м (с увеличением стороны в три раза), тогда $A_{\text{факт}} = 0,292$ м², $v_0 = 3,46$ м/с, $H = 17$ м, $v_x = 0,445$ м/с $> 0,42$, но разница лежит в пределах точности расчёта; $\Delta t_x = 0,58^\circ\text{C} < 1,5^\circ\text{C}$, условие прилипания ($2 \times 4,95 > 0,5 \times 17 = 8,5$) также формально не выполнено, однако это невыполнение не слишком значительно и находится в пределах точности расчёта.

Следовательно, предлагаемую схему целесообразно использовать в отдельных крупных помещениях, преимущественно высоких, с сетью потолочных воздухораспределителей, а при выхлопе

непосредственно в помещение — с установкой диффузора, снижающего начальную скорость воздушного потока.

При этом очевидными достоинствами предлагаемой схемы являются, во-первых, отсутствие внешних теплообменников на фасадах здания или, по крайней мере, уменьшение их количества, так как оборудование для «свободного охлаждения» в данном случае размещается уже внутри помещения, а во-вторых, упрощение схемы обвязки трубопроводами внутренних блоков местной системы охлаждения и, следовательно, их регулирования, поскольку устраняются циркуляционные контуры, связывающие с внешними теплообменниками. Кроме того, схема может быть собрана из стандартного серийного оборудования.

В качестве недостатка можно отметить необходимость расширения отверстий в наружной стене, которые теперь должны рассчитываться, исходя не из диаметров трубопроводов, а по размерам каналов для наружного воздуха, которые должны быть тщательно теплоизолированы для недопущения промерзания наружной стены, а также возможное увеличение стоимости добавляемого комплекта оборудования по сравнению с исключаемым, но это может быть определено только по результатам технико-экономического расчёта.

Результаты, представленные в статье, получены в ходе выполнения научно-исследовательской работы (НИР) для подачи заявки на патент РФ «Конструкция системы кондиционирования воздуха со свободным охлаждением в пластинчатом рекуператоре» от НИУ МГСУ от 12.12.2025 №2025135541. ●

- Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 23.11.2009 №261-ФЗ.
- Фролова А.А., Лухменев П.И. Энергетическое обоснование выбора системы кондиционирования воздуха для административно-торгового центра // Строительство: наука и образование, 2021. Т. 11. Вып. 2. С. 38–45.
- Малыгина Е.Г., Фролова А.А. Зависимость уровня теплозащиты здания от структуры нагрузок на системы круглогодичного поддержания микроклимата // Известия вузов. Строительство, 2022. №11. С. 53–63.
- Малыгина Е.Г., Фролова А.А. Выбор экономически целесообразной теплозащиты зданий на Севере РФ // Жилищное строительство, 2022. №12. С. 72–78.
- Фролова А.А., Лухменев П.И. Расчёт уровня энергетически целесообразной теплозащиты // Вестник МГСУ, 2023. Т. 18. Вып. 1. С. 82–90.
- Жерлыкина М.Н., Щукина Т.В., Гурбангулыев А. Оптимизация процессов кондиционирования воздуха здания с применением режима естественного охлаждения // Известия ЮЗГУ, 2020. №24. С. 73–89.
- Jocić A., Lenassi P., Osterman E., Stritih U. Ventilation system with heat recovery and PCM thermal energy storage for “free” cooling in buildings. Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 2766. No. 1. No. 012232.

- Mi R., Bai X., Xu X., Ren F. Energy performance evaluation in a data center with water-side free cooling. Energy and Buildings. 2023. Vol. 295. No. 113278.
- Zhang Ju., Mao R., Li Ch., Lan J., Yi X., Zhang Z. Optimization air-conditioning system and thermal management of data center via fan-wall free cooling technology. Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 234. No. 121245.
- Самарин О.Д. О целесообразности применения свободного охлаждения в системах кондиционирования воздуха в холодный период года // Известия вузов. Строительство, 2017. №5. С. 71–77.
- СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха [СНиП 41-01-2003] (с Попр., с Изм. №1–4) / Дата введ.: 01.07.2021.
- Самарин О.Д. Расчёт требуемой температуры притока при автоматическом регулировании центральных систем кондиционирования воздуха // Известия вузов. Строительство, 2025. №1. С. 88–95.
- Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 3: Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2 / Под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. — М.: Стройиздат, 1992. 416 с.
- ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях (с Попр., с Изм. №1) / Дата введ.: 01.01.2013.

References — see pages 79.

The use of plate heat exchangers in the “free cooling” scheme for the assimilation of heat surpluses in the room. Pp. 55–57.

Oleg D. Samarin, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

1. *Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmenenij v otдельnye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federatsii* [On energy saving and improving energy efficiency and amending certain legislative acts of the Russian Federation]. *Federal'nyj zakon of 23.11.2009 №261-FZ (s izm. i dop.)* [Federal Law No. 261-FL of November 23, 2009 (with Amendments and Additions)]. [In Russian]
2. A.A. Frolova, P.I. Lukhmenov. *Energeticheskoe obosnovanie vybora sistemy konditsionirovaniya vozdukh dlya administrativno-torgovogo tsentra* [Energy justification for selecting an air conditioning system for an administrative and shopping center]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [“Construction: Science and Education” Magazine]. 2021. Vol. 11. Issue 2. Pp. 38–45. [In Russian]
3. E.G. Malyavina, A.A. Frolova. *Zavisimost' urovnya teplozashchity zdaniya ot struktury nagruzok na sistemy kruglogodichnogo podderzhaniya mikroklimata* [Dependence of the level of thermal protection of a building on the structure of loads on year-round microclimate maintenance systems]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2022. No. 11. Pp. 53–63. [In Russian]
4. E.G. Malyavina, A.A. Frolova. *Vybor ekonomicheskoi tselesoobraznoj teplozashchity zdaniy na Severe RF* [Selecting economically feasible thermal protection for buildings in the North of the Russian Federation]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [“Housing Construction” Magazine]. 2022. No. 12. Pp. 72–78. [In Russian]
5. A.A. Frolova, P.I. Lukhmenov. *Raschet urovnya energeticheskoi tselesoobraznoj teplozashchity* [Calculating the level of energetically feasible thermal protection]. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU. Monthly Journal on Construction and Architecture (Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering)]. 2023. Vol. 18. Issue 1. Pp. 82–90. [In Russian]
6. M.N. Zherlykina, T.V. Shchukina, A. Gurbangulyev. *Optimizatsiya protsessov konditsionirovaniya vozdukh zdaniya s primeneniem rezhima estestvennogo okhlazhdeniya* [Optimization of building air conditioning processes using natural cooling mode]. *Izvestiya YuZGU* [Bulletin of the South-West State University of the Russia Federation]. 2020. No. 24. Pp. 73–89. [In Russian]
7. A. Jocić, P. Lenassi, E. Osterman, U. Stritih. Ventilation system with heat recovery and PCM thermal energy storage for “free” cooling in buildings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2766. No. 1. No. 012232.
8. R. Mi, X. Bai, X. Xu, F. Ren. Energy performance evaluation in a data center with water-side free cooling. *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 295. No. 113278.
9. Ju. Zhang, R. Mao, Ch. Li, J. Lan, X. Yi, Z. Zhang. Optimization air-conditioning system and thermal management of data center via fan-wall free cooling technology. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 234. No. 121245.
10. O.D. Samarin. *O tselesoobraznosti primeneniya svobodnogo okhlazhdeniya v sistemakh konditsionirovaniya vozdukh v kholodnyj period goda* [On the feasibility of using free cooling in air conditioning systems during the cold Season]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 5. Pp. 71–77. [In Russian]
11. SP 60.13330.2020 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 60.13330.2020]. *Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh [SNiP 41-01-2003] (s Popr., s Izm. №1-4)* [The Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 41-01-2003]. Date of impl.: July 1, 2021. [In Russian]
12. O.D. Samarin. *Raschet trebuemoj temperatury pritoka pri avtomaticheskoy regulirovani tsentral'nykh sistem konditsionirovaniya vozdukh* [Calculation of the required supply temperature for automatic regulation of central air conditioning systems]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2025. No. 1. Pp. 88–95. [In Russian]
13. *Spravochnik proektirovshchika. Vnutrennie sanitarno-tekhnicheskie ustroystva. Ch. 3: Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh. Kn. 2* [Designer's Handbook. Internal Sanitary and Technical Fixtures. Part 3: Ventilation and Air Conditioning. Book 2]. Edited by N.N. Pavlov i Yu.I. Shiller. Moscow. *Strojizdat* [Publishing House of Literature on the Construction and Architecture (“Stroiizdat” Publishers)]. 1992. 416 p. [In Russian]
14. GOST 30494–2011 [The State Industry Standard of Russia No. 30494–2011]. *Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyakh (s Popr., s Izm. №1)* [Residential and Public Buildings. Indoor Microclimate Parameters (with Amendment, with Amendment No. 1)]. Date of impl.: January 1, 2013. [In Russian]