Научная статья
УДК 697.93+533.275.08

ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Е.А. Оленев[1,*]

[1]Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия
[*]E-mail: olenevea@mail.ru

Аннотация. Предлагается аналитический метод расчета параметров влажного воздуха для определения оптимальных и допустимых его значений в помещении. Этот метод может быть использован для расчета устройств и систем кондиционирования воздуха, не пользуясь при этом психрометрическими таблицами. Погрешность разработанных формул приемлема для практических расчетов. Показана возможность вентиляции помещения с помощью вихревых воздушных колец.

Ключевые слова: *температура; влажность; воздух; кондиционер; искусственный климат*.

Для цитирования: Оленев Е.А. Психрометрический метод определения параметров влажного воздуха // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2024. Т.10. №3. С. 59–66.

Original article

PSYCHROMETRIC METHOD DEFINITION OF PARAMETERS HUMID AIR

E.A. Olenev[1,*]

[1]Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai GrigoryevichStoletov, Vladimir, Russia
[*]E-mail: olenevea@mail.ru

Abstract. An psychrometric method is proposed for calculation of parameters humid air to definition optimum and permissible of it significants in living accommodation. This method it is possible for calculation of the arrangements and air-condition systems without psychrometric tables. The error of working out formulas is acceptability for practical calculations. A possibility is ventilation living accommodation with the help of vortical air rings.

Keywords: *temperature; humidity; air; air-condition; artificial climate.*

Forcitation: Olenev E.A. Psychrometric method definition of parameters humid air. *Journal of Science and Education of North-West Russia*.2024. Vol.10, No.3, pp. 59–66.

Введение

Самочувствие человека в жилом помещении определяется его взаимодействием с окружающей средой, которая может оказывать как благоприятные, так и неблагоприятные воздействия на его здоровье. Температура, влажность и ряд других факторов характеризуют микроклимат в помещениях, который во многом определяет состояние здоровья,

© Оленев Е.А. 2024

самочувствие и работоспособность людей [1].

Обычно задача обеспечения микроклимата в помещении в основном сводится к тепло-влажностной обработке воздуха и формированию его газового состава. Гигиеническое значение этих процедур заключается в их влиянии на тепловое равновесие организма, поскольку, как известно, высокая температура воздуха в сочетании с повышенной влажностью и малой скоростью воздуха затрудняет отдачу тепла путем конвекции и испарения, в результате чего возможно перегревание организма, а при низкой температуре, высокой влажности и скорости воздуха наблюдается противоположная картина – переохлаждение, обусловленное увеличением отдача тепла. Возрастание влажности, т. е. насыщенности воздуха помещения водяными парами, приводит к снижению отдачи тепла испарением. Влажность является важной составляющей микроклимата, поскольку ее изменения могут сказаться на здоровье и общем самочувствии людей.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) фиксирует оптимальный показатель влажности воздуха в помещениях на отметке 45%. Большинство научных организаций, имеющих отношение к сохранению здоровья людей, рекомендуют поддерживать уровень относительной влажности в помещении в пределах 30 – 50 %. Определение понятия «микроклимат» и описание его основных параметров представлены в межгосударственном стандарте – ГОСТе 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях», согласно которому оптимальная влажность воздуха для жилых помещений должна составлять 30 – 45% в холодный период года и 30 – 60% – в тёплый. Допустим показатель 60% и 65% соответственно. Однако целесообразно подбирать значение относительной влажности воздуха с учетом индивидуальных особенностей человека.

Существует много различных методов измерения относительной влажности воздуха, одним из которых является психрометрический метод измерения, который благодаря своей простоте и доступности не теряет актуальности и в настоящие дни. Часто психрометры можно увидеть в жилых помещениях, где любой человек по показаниям двух термометров и психрометрической таблице, изображенной на его корпусе, может определить относительную влажность воздуха[1]. Однако применение указанной таблицы не всегда удобно, например, при проведении расчетов и определении границ зоны комфорта. Предлагаемый аналитический метод расчета относительной влажности устраняет этот недостаток, кроме того, появляется возможность математического моделирования параметров микроклимата.

Определение относительной влажности воздуха с помощью формул

В соответствии с психрометрическими таблицами, приведенными в [2], для различных значений температур сухого и влажного термометров автором были разработаны следующие математические формулы.

Относительная влажность воздуха по показаниям температуры сухого термометра и разности показаний температур последнего и влажного термометра может быть найдена по следующей формуле $\left(\varphi = f\left(t_{\text{сух.}},\ \Delta t\right)\right)$

$$\varphi = -\left(37{,}1121 {t_{\text{сух.}}}^{-0{,}5553}\right)\Delta t + 0{,}077 t_{\text{сух.}} + 92{,}35, \qquad (1)$$

где φ – относительная влажность воздуха, %; $t_{\text{сух.}}$– температура сухого термометра, ºС; Δt – разность температур сухого и влажного термометров.

По данной формуле при изменении температуры сухого термометра от 15 до 40ºС и разности температур сухого и влажного термометров от 4 до 10ºС были проведены расчеты

[1] Гигрометр психрометрический ВИТ. Инструкция по эксплуатации Мб.2.844.000.ИЭ.

относительной влажности воздуха, результаты которых и погрешность вычислений по формуле (1) сведены в табл. Обозначения с индексом «д» соответствуют данным психрометрической таблицы, номер в круглых скобках показывает номер формулы, по которой проводились вычисления, относительная погрешность обозначена буквой δ.

Таблица – Зависимость относительной влажности от температуры сухого и влажного термометров

Δt, °C	Температура сухого термометра $t_{сух}$,°C											
	15			**16**			**17**			**18**		
	$\varphi_д$, %	**(1)**	**δ, %**	$\varphi_д$, %	**(1)**	**δ, %**	$\varphi_д$, %	**(1)**	**δ, %**	$\varphi_д$, %	**(1)**	**δ, %**
4	61	60,51	-0,8	62	61,75	-0,41	64	62,88	-1,76	65	63,91	-1,67
5	52	52,26	0,5	54	53,79	-0,40	55	55,18	0,33	56	56,46	0,82
6	44	44,01	0	46	45,83	-0,38	47	47,48	1,03	49	49,00	0
7	36	35,76	-0,6	37	37,87	2,35	39	39,79	2,02	41	41,55	1,34
8	27	27,51	1,8	30	29,91	-0,30	32	32,09	0,29	34	34,09	0,28
9	20	19,26	-3,7	22	21,95	-0,23	24	24,40	1,66	27	26,64	-1,34
10	12	11,01	-8,2	15	13,99	-6,73	17	16,70	-1,75	20	19,18	-4,08
	19			**20**			**21**			**22**		
4	65	64,87	-0,19	66	65,76	-0,36	67	66,59	-0,61	68	67,37	-0,93
5	58	57,64	-0,62	59	58,73	-0,45	60	59,75	-0,42	61	60,70	-0,49
6	50	50,40	0,81	51	51,70	1,37	52	52,91	1,74	54	54,03	0,05
7	43	43,17	0,39	44	44,67	1,52	46	46,06	0,13	47	47,36	0,77
8	35	35,93	2,67	37	37,64	1,72	39	39,22	0,56	40	40,69	1,73
9	29	28,70	-1,03	30	30,61	2,02	32	32,37	1,17	34	34,02	0,06
10	22	21,47	-2,43	24	23,57	-1,77	26	25,53	-1,81	28	27,35	-2,31
	23			**24**			**25**			**26**		
4	69	68,09	-1,31	69	68,78	-0,32	70	69,43	-0,82	71	70,04	-1,35
5	61	61,59	0,96	62	62,43	0,69	63	63,21	0,34	64	63,96	-0,06
6	55	55,08	0,15	56	56,07	0,13	57	57,00	0,00	58	57,88	-0,20
7	48	48,58	1,20	49	49,72	1,46	50	50,79	1,58	51	51,80	1,58
8	42	42,07	0,16	43	43,36	0,84	44	44,58	1,31	46	45,73	-0,60
9	36	35,56	-1,22	37	37,01	0,02	38	38,37	0,96	40	39,65	-0,88
10	30	29,06	-3,15	31	30,65	-1,12	33	32,15	-2,56	34	33,57	-1,27
	27			**28**			**29**			**30**		
4	71	70,62	-0,54	72	71,17	-1,15	72	71,70	-0,42	73	72,20	-1,09
5	64	64,67	1,04	65	65,34	-1,00	66	65,98	-0,03	67	66,59	-0,61
6	58	58,72	1,23	59	59,51	-0,82	60	60,26	0,43	61	60,98	-0,04
7	52	52,76	1,47	53	53,67	-0,60	54	54,54	1,00	55	55,36	0,66
8	47	46,81	-0,40	48	47,84	-2,37	49	48,82	-0,37	50	49,75	-0,50
9	41	40,86	-0,34	42	42,01	-2,31	43	43,10	0,23	44	44,13	0,31
10	36	34,91	-3,04	37	36,17	-4,81	38	37,38	-1,64	39	38,52	-1,23
	32			**34**			**36**			**38**		
4	73	73,15	0,20	74	74,02	0,03	75	74,83	-0,23	76	75,58	-0,55
5	67	67,73	1,09	68	68,78	1,15	69	69,75	1,09	70	70,66	0,94

6	62	62,32	0,51	63	63,55	0,87	64	64,68	1,06	65	65,74	1,13
7	57	56,90	-0,18	58	58,31	0,53	59	59,61	1,03	60	60,81	1,35
8	52	51,48	-0,99	54	53,07	-1,72	56	54,53	-2,62	56	55,89	-0,20
9	46	46,07	0,15	48	47,83	-0,34	50	49,46	-1,08	51	50,97	-0,07
10	41	40,65	-0,85	43	42,60	-0,94	45	44,39	-1,36	45	46,04	2,32

Как видно из таблицы погрешности вычислений по формуле (1) небольшие и эта формула вполне пригодна для практических расчетов.

С достаточной точностью относительную влажность можно рассчитать и по упрощенной формуле

$$\varphi = 100 - 35\Delta t/\sqrt{t_{\text{сух.}}}. \quad (2)$$

Это можно сделать с помощью простого калькулятора, который не имеет функции возведения числа в дробную степень, или даже в уме. Например для $t_{\text{сух.}} = 25$ ℃ и $\Delta t = 4$, будем иметь: $\varphi = 100 - 35 \cdot 4/\sqrt{25} = 72$ %. Вычисление по формуле (1) (см. табл.) дает значение 69,43 %. Погрешность составляет 3,7 %. Для $t_{\text{сух.}} = 36$ ℃ и $\Delta t = 4$, будем иметь: $\varphi = 100 - 35 \cdot 4/\sqrt{36} = 77{,}7$ %. По формуле (1) имеем 74,83 %. Погрешность равна 2,45 %. При той же температуре $t_{\text{сух.}} = 36$ ℃ и $\Delta t = 10$ получим по формуле (1) имеем 44,39 %, а по формуле (2) значение относительной влажности воздуха составит 41,7 %, а погрешность будет равна – 6 %.

Разность показаний температур сухого и влажного термометров можно выразить через величину температуры влажного термометра ($t_{\text{вл.}}$). Тогда формула (1) примет вид

$$\varphi = -\left(37{,}1121 {t_{\text{сух.}}}^{-0{,}5553}\right)\left(t_{\text{сух.}} - t_{\text{вл.}}\right) + 0{,}077 t_{\text{сух.}} + 92{,}35, \quad (3)$$

где $t_{\text{вл.}}$ – температура влажного термометра, ºС.

Нахождение оптимальных и допустимых параметров воздуха

Нормативными документами [3] установлены оптимальные и допустимые сочетания параметров воздуха. Оптимальными считаются сочетания параметров, которые при систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального и функционального теплового состояния его организма без напряжения реакций терморегуляции, ощущение теплового комфорта и предпосылки для высокого уровня работоспособности.

Допустимыми считаются сочетания параметров, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызывать переходящие и быстро нормализующиеся изменения функционального и теплового состояния организма и напряжения реакций терморегуляции, не выходящие за пределы физиологических приспособительных возможностей. При этом могут наблюдаться дискомфортные тепловые ощущения, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности.

Для нахождения указанных параметров воздуха удобнее определять не влажность воздуха, а знать пределы, в которых должны находиться значения температуры влажного термометра (при данной температуре сухого термометра), соответствующие рекомендуемым параметрам (зонам). В соответствии с диаграммами и графиками, приведенными в работе [4], были рассчитаны пределы, в которые должны укладываться показания влажного термометра, характеризующие ту или иную зону воздушной среды в жилом помещении (рис. 1).

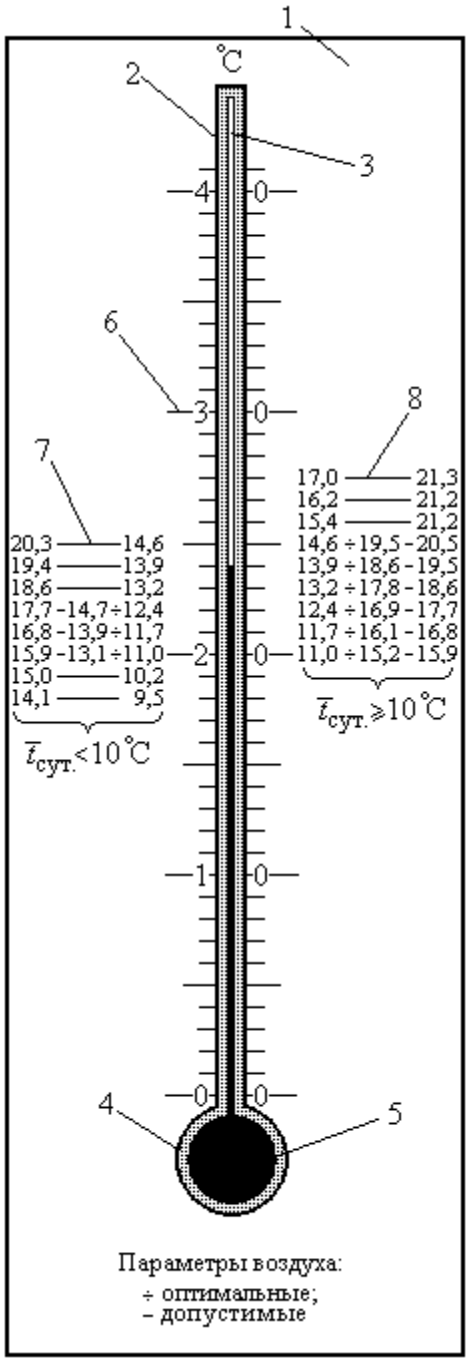


Рисунок 1 – Сухой термометр с дополнительными шкалами

Термометр (сухой) психрометра содержит закрепленную на основании 1 трубку 2 с капилляром 3, соединенную с емкостью 4, которая заполнена жидкостью 5. На основание помимо основной шкалы 6 нанесены дополнительные шкалы 7 и 8, отображающие диапазоны температур влажного термометра (не показан) которые соответствуют оптимальным и допустимым параметрам воздуха. По шкале 6 отсчитываются показания температуры сухого термометра. Шкала 7 предназначена для определения параметров воздуха в холодный и переходный период года, когда средняя суточная температура ($\bar{t}_{сут.}$) меньше 10 ˚С, а шкала 8 – в теплый период, когда средняя суточная температура больше или равна 10 ˚С. Крайние столбцы на шкалах 7 и 8 определяют для каждого значения температуры сухого термометра границы показаний влажного термометра, которые обуславливают допустимые параметры воздуха. Между указанными столбцами находится третий столбец, значения температур которого выделяют диапазон показаний влажного термометра, при которых параметры воздуха являются оптимальными (комфортными). Например при температуре сухого термометра 24 ˚С в теплый период года параметры воздуха будут комфортными, если значения температуры влажного термометра будут в пределах от 13,9 до 18,6˚С. Указанные значения лежат на условной (мнимой) горизонтали, исходящей из 24-го деления сухого термометра. После превышения влажным термометром отметки 18,6˚С до величины 19,15˚С параметры воздуха будут допустимыми.

В холодный и переходный периоды года при указанной температуре сухого термометра создать комфортные параметры нельзя. Если значения температуры влажного термометра будут лежать в пределах от 13,9 до 19,4˚С, то параметры воздуха будут допустимыми.

Значения температур, изображенных на дополнительных шкалах, можно описать математически, и с помощью полученных формул построить диаграммы, отражающие зоны допустимых и оптимальных параметров воздуха (рис. 2). Определение зоны параметров воздуха сводится к нахождению положения точки перекрестия горизонтали, идущей от значения температуры сухого термометра, и вертикали, исходящей от значения температуры влажного термометра. На этом рисунке не заштрихованы зоны комфорта, а область допустимых значений обозначена точками.

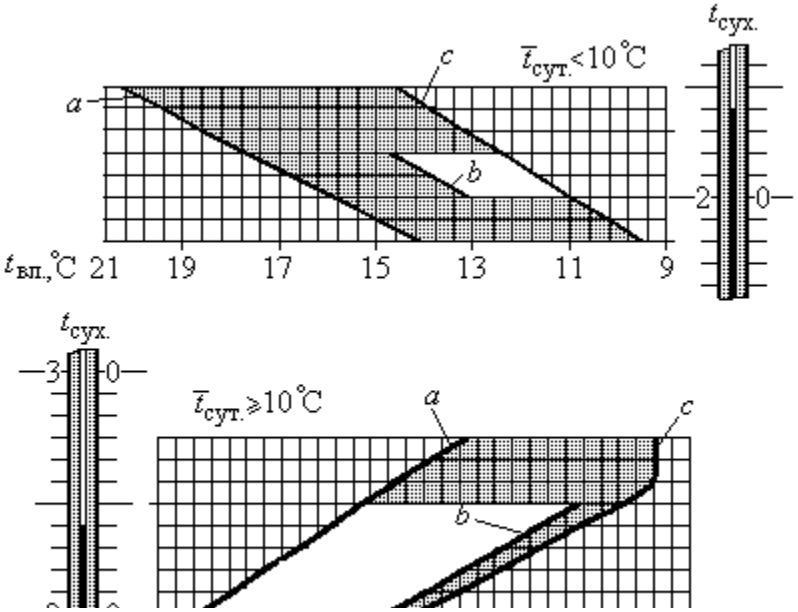


Рисунок 2 – Сухой термометр с диаграммами для определения параметров воздуха

Для холодного и переходного периода года линии *a*,*b* и*c* соответственно описываются уравнениями (4), (5) и (6)

$$t_{вл.} = 0{,}885t_{сух.} - 1{,}817; \quad (4)$$

$$t_{вл.} = 0{,}8t_{сух.} - 2{,}9; \quad (5)$$

$$t_{вл.} = 0{,}732t_{сух.} - 3{,}678; \quad (6)$$

Для теплого периода года линии *a*, *b* и *c* соответственно описываются уравнениями (7), (8) и (9). Нахождение параметров воздуха аналогично, описанному выше.

$$t_{вл.} = 0{,}748t_{сух.} - 4{,}026; \quad (7)$$

$$t_{вл.} = 0{,}854t_{сух.} - 1{,}871; \quad (8)$$

$$t_{вл.} = -0{,}01496{t_{сух.}}^3 + 1{,}015{t_{сух.}}^2 - 21{,}5. \quad (9)$$

Указанные в статье границы были вычислены по представленным формулам, которые могут быть применены аналогичным образом для другого вида помещений (зданий) и категорий выполняемых в них работ.

Как уже отмечалось, самочувствие людей в помещении в первую очередь определяются условиями тепло- и влагообмена. Однако на самочувствие также влияют состояние здоровья человека, его психологическое состояние, нервное напряжение и т.д., поэтому желательно также учитывать и его индивидуальные особенности. Например изменение влажности воздуха влечет за собой изменение самочувствия, как правило, у пожилых людей, причем некоторые из них лучше чувствуют себя при высокой влажности, а другие – при низкой. Объяснить это можно следующим образом.

Если у организма человека снижена эффективность удаления углекислого газа из крови и тканей, то такой человек лучше будет чувствовать себя при высокой влажности, если при этом ему будет хватать находящегося в этом воздухе кислорода, содержание которого, естественно, будет меньше, чем в сухом и более плотном воздухе. Этим, кстати, можно объяснить высокую продолжительность жизни некоторых из людей в полуподвальных помещениях, которые считаются малопригодными для жилья. В таких помещениях, воздух, как правило, сырой, а следовательно, менее плотный, способствующий лучшему удалению углекислоты из организма и меньшему поступлению кислорода в организм. Однако если человеку достаточно имеющегося в таком воздухе кислорода, то даже при наличии пониженной эффективности вывода CO_2 этот человек будет себя нормально чувствовать и такой микроклимат не будет отрицательно сказываться на его здоровье.

Если специфика организма у человека такая, что удаление углекислого газа происходит нормально, то понижение атмосферного давления для увеличения выхода CO_2

ему не требуется, и в случае недостатка ему кислорода в таком влажном воздухе, у него будет иметь место гипоксия, которая может привести к патологии. Особенно это относится к мужчинам, которые по сравнению с женщинами заняты более тяжелым физическим трудом, в результате которого в их организме образуется кислородный долг. Придя в помещения с высокой влажностью, они не могут быстро ликвидировать этот долг, а поэтому их организм функционирует в условиях недостатка кислорода. Накопившиеся у них в тканях организма молочная и угольная кислоты вызывают повышение утилизации кислорода тканями, который, поступает из влажного воздуха уже в недостаточном для этого количестве.

С этих позиций можно объяснить наличие большого числа долгожителей среди горцев. Чистый горный воздух способствует хорошему газообмену организма с внешней средой. Поскольку быт у этих людей, как правило, очень простой, и они не подвержены высоким физическим нагрузкам, то пониженного содержания кислорода в горном воздухе оказывается в большинстве случаев достаточным для нормальной жизнедеятельности организма.

Каждый человек должен определить для себя диапазон изменения атмосферного давления и влажности, в котором у него наблюдается кислотно-щелочное равновесие в крови.

Заключение

1. Предложенные уравнения позволяют аналитическим путем с достаточной для практических расчетов точностью определять оптимальные о допустимые параметры воздуха, не пользуясь при этом психрометрическими таблицами. Это, в свою очередь, дает возможность проводить моделирование работы различных систем подготовки воздуха в зависимости от изменяющихся его параметров, а также выполнять прогнозирование их работы, при этом появляется возможность автоматизации расчетов на компьютере.
2. Формула (2) позволяет оценить влажность воздуха путем несложных вычислений в уме или на калькуляторе, который не имеет функции возведения числа в дробную степень.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мануева Р.С. Гигиеническая оценка микроклимата: учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИГМУ, 2020. 68 с.
2. ГОСТ 8.811-2012. Таблицы психрометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения. Издание официальное. Москва: Стандартинформ, 2019. 23 с.
3. ГОСТ 12.1.005-88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Издание официальное. Москва: Стандартинформ, 2008. 49 с.
4. Баркалов Б.В, Карпис Е.Е. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. Москва: Стройиздат, 1982. 312 с.

REFERENCES

1. Manueva R.S. *Gigienicheskaya ocenka mikroklimata: uchebnoe posobie*. [Hygienic assessment of microclimate: a textbook]. Irkutsk: Izd-vo IGMU, 2020. 68 p.
2. GOST 8.811-2012. *Tablicy psihrometricheskie. Postroenie, soderzhanie, raschetnye sootnosheniya. Izdanie oficial'noe* [Psychrometric tables. Construction, content, calculated ratios. The publication is official]. Moscow: Standartinform, 2019. 23 p.
3. GOST 12.1.005-88. *Mezhgosudarstvennyj standart. Sistema standartov bezopasnosti truda. Obshchie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozduhu rabochej zony. Izdanie oficial'noe.*

[Interstate standard. The system of occupational safety standards. General sanitary and hygienic requirements for the air of the working area. The publication is official]. Moscow: Standartinform, 2008. 49 p.

4. Barkalov B.V, Karpis E.E. *Kondicionirovanie vozduha v promyshlennyh, obshchestvennyh i zhilyh zdaniyah* [Air conditioning in industrial, public and residential buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1982. 312 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Оленев Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87, e-mail:olenevea@mail.ru)	*Olenev Evgeny Alexandrovich* – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, (600000, Russia, Vladimir, 87 Gorky Street, e-mail:olenevea@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 04.03.2024; одобрена после рецензирования 20.03.2024, принята к публикации 04.04.2024.
The article was submitted 04.03.2024; approved after reviewing 20.03.2024; accepted for publication 04.04.2024.