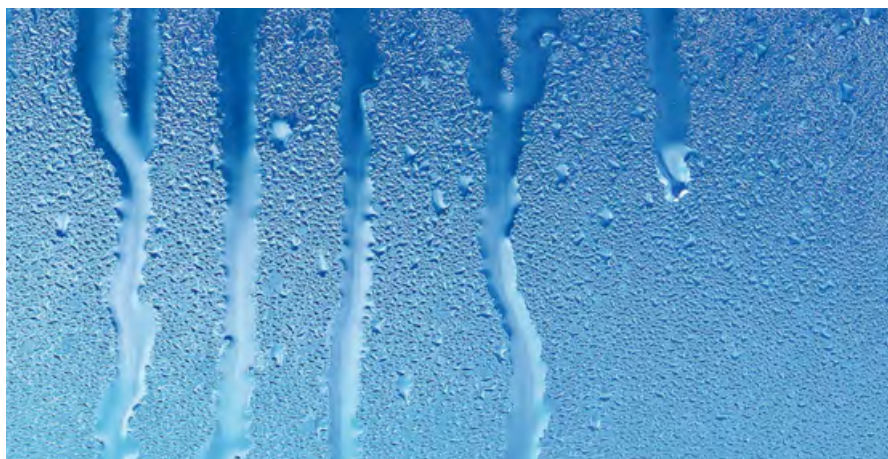




Аналитический расчёт параметров состояния влажного воздуха в специальной схеме обработки притока

Рецензия эксперта на статью получена
08.07.2020 [Expert review on the article
received on July 8, 2020].

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) в нашей стране обеспечивает почти четверть её ВВП, привлекает порядка трети инвестиций и формирует около 40 % доходной части федерального бюджета. Поэтому необходимо уделять серьёзное внимание инфраструктуре топливно-энергетического комплекса, который, в свою очередь, должен гарантировать всем предприятиям и каждому гражданину нашей страны надёжный и качественный доступ к энергоресурсам. В этой связи 2 апреля 2020 года на заседании Правительства РФ был рассмотрен и одобрен проект «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года». В разделе данного документа, касающемся энергосбережения и энергоэффективности, констатируется снижение энергоёмкости ВВП на 9,3 % с 2008 по 2018 годы. Однако вместе с тем отмечается, что в нашей стране ещё имеется большой потенциал энергосбережения, способный привести к значительному повышению экономической эффективности проектов. Кроме того, развитие энергосбережения будет

содействовать дальнейшему уменьшению энергоёмкости ВВП, что, в свою очередь, ведёт к росту уровня качества жизни населения [1–6]. Аналогичные данные приводятся также в ряде зарубежных публикаций, например, [7–8].

В то же время капитальные затраты на реализацию инженерных систем кондиционирования воздуха в зданиях составляют порядка 15–20 %, а эксплуатационные затраты достигают 60–80 % от общих расходов на энергообеспечение здания [9]. В связи с этим в работе [10]

В нашей стране имеется большой потенциал энергосбережения, способный привести к значительному повышению экономической эффективности проектов. Кроме того, развитие энергосбережения будет содействовать дальнейшему уменьшению энергоёмкости ВВП, что, в свою очередь, ведёт к росту уровня качества жизни населения

УДК 697.001:628.8. Научная специальность: 05.23.03.

Аналитический расчёт параметров состояния влажного воздуха в специальной схеме обработки притока

О. Д. Самарин, к.т.н., доцент; **Д. А. Кирушок**, аспирант, преподаватель, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Рассмотрены условия осуществления процесса косвенного испарительного охлаждения притока в прямооточных системах кондиционирования воздуха в тёплый период года при использовании пластинчатого рекуператора в предложенной авторами схеме обработки притока. Дано аналитическое описание изменения состояния воздуха в основных элементах приточно-вытяжной установки и обслуживаемом помещении на основе построения соответствующих процессов в *I-d*-диаграмме с использованием известных соотношений между параметрами состояния влажного воздуха. Получена теоретическая оценка фактической температуры увлажнённой вытяжки перед рекуператором и поступающего в помещение притока при известных параметрах внутреннего воздуха и наружного климата в рассматриваемом районе строительства. Представлены результаты многовариантных расчётов с использованием найденной зависимости для климатических условий Москвы и оптимальных значений внутренних метеопараметров в соответствии с действующими нормативными документами Российской Федерации.

Ключевые слова: энергосбережение, энергоёмкость ВВП, кондиционирование воздуха, испарительное охлаждение, параметры внутреннего микроклимата, пластинчатый рекуператор, наружный климат.

UDC 697.001:628.8. The number of scientific speciality: 05.23.03.

Analytical calculation of parameters of the humid air state in a special flow processing scheme

O. D. Samarin, PhD, Associate Professor; **D. A. Kirushok**, postgraduate student, lecturer, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

The conditions for implementing the process of indirect evaporative cooling of the inflow in direct-flow air conditioning systems in the warm season when using a plate regenerator in the flow treatment scheme proposed by the authors are considered. An analytical description of changes in the air condition in the main elements of the supply and exhaust system and the serviced room is given based on the construction of the corresponding processes in the *I-d* diagram using the known relations between the parameters of the state of humid air. The theoretical estimation of the actual temperature of the humidified exhaust air in front of the heat exchanger and the incoming inflow to the room at known parameters of the internal air and external climate in the construction area under consideration is obtained. The results of multivariate calculations using the found dependence for the climatic conditions of Moscow and the optimal values of internal meteorological parameters in accordance with the current regulatory documents of the Russian Federation are presented.

Key words: energy saving, GDP energy intensity, air conditioning, evaporative cooling, indoor microclimate parameters, plate heat exchanger, outdoor climate.

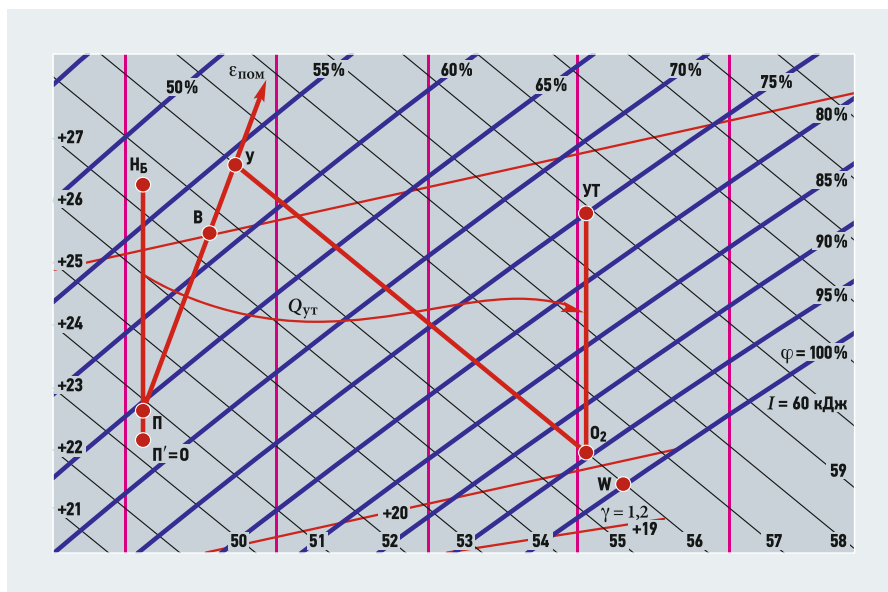


Рис. 1. Изображение на $I-d$ -диаграмме процессов в предлагаемой авторами установке

авторами предложена конструкция энергосберегающей установки кондиционирования воздуха с применением косвенного испарительного охлаждения. Идея данной конструкции заключается в том, что приточный воздух, проходя через пластинчатый рекуператор, испытывает в тёплый период года «сухое» охлаждение без увеличения влагосодержания, что существенно расширяет границы применения данной схемы в системах кондиционирования воздуха.

В новых зданиях и сооружениях применяются, как правило, более современные технологические и технические решения, а также к ним предъявляются и более высокие санитарно-эпидемиологические требования

Однако некоторым недостатком такого способа обработки воздуха является то обстоятельство, что состояние притока на выходе из установки в значительной степени зависит от климатических параметров в районе строительства, в первую очередь от температуры, относительной влажности и энтальпии наружного воздуха. Авторами в работе [11] был рассмотрен вопрос о возможности применения косвенного испарительного охлаждения для систем кондиционирования воздуха в пределах Российской Федерации в зависимости от климатических условий различных регионов, и по результатам данного исследования был сделан вывод о том, что схема, описанная в [10], пригодна для реализации на подавляющей

части территории нашей страны. Кроме того, нужно учитывать, что в новых зданиях и сооружениях применяются, как правило, более современные технологические и технические решения, а также к подобным зданиям предъявляются ещё и более высокие санитарно-эпидемиологические требования. При этом процессы обработки (перенос теплоты и массы) воздуха в контактных аппаратах являются достаточно сложными, многоступенчатыми, и необходимость их исследования и расчёта сильно затрудняет, а порой делает и невозможным реальное проектирование систем кондиционирования воздуха с учётом ограниченных сроков работ.



Следовательно, при разработке таких систем необходимо иметь широкий диапазон конструктивных решений и иметь возможность рассчитывать многовариантные процессы изменения тепловлажностного состояния воздуха аналитическими и численными методами.

Поэтому авторами предлагается аналитическое решение задачи определения положения на $I-d$ -диаграмме основных точек, характеризующих процессы обработки воздуха в предложенной ими схеме, при этом сам процесс обработки воздуха показан на рис. 1 [10].

Параметры основных точек на рис. 1: H_B — состояние наружного воздуха (параметры «Б» по СП 131.13330.2018 «Строительная климатология», далее — СП 131); $\Pi' = O$ — точка после пластинчатого теплообменника перед вентилятором; Π — состояние притока в помещение с учётом подогрева в секции вентилятора на $0,5^\circ\text{C}$; B — внутренний воздух [температура максимальная, относительная влажность близкая к максимальной из оптимальных в тёплый период года (ТП) по ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях»]; Y — уходящий (вытяжной) воздух из помещения; W — предельно возможное состояние уходящего (вытяжного) воздуха после адиабатного увлажнения; O_2 — точка реального положения уходящего воздуха после секции адиабатного охлаждения перед пластинчатым теплообменником; YT — состояние уходящего воздуха после пластинчатого теплообменника.

Используя коэффициент температурной эффективности пластинчатого теплообменника $k_{эф}$, можно найти выражение для температуры притока $t_{п}$, °C:

$$t_{п} = t_{НБ} - k_{эф}(t_{НБ} - t_{о2}) + 0,5, \quad (1)$$

где $t_{НБ}$ — расчётная температура наружного воздуха в ТП для рассматриваемого района строительства по параметрам «Б» в соответствии с табл. 4.1 СП 131, °C; $t_{о2}$ — температура вытяжного воздуха перед поступлением в рекуператор после секции адиабатного охлаждения, °C; добавка 0,5°C учитывает среднюю величину подогрева притока в вентиляторе перед подачей в помещение.

Из выражения для энтальпии влажного воздуха определяем влагосодержание притока $d_{п}$, г/кг:

$$d_{п} = d_{НБ} = (I_{НБ} - 1,005t_{НБ})/2,49, \quad (2)$$

где $I_{НБ}$ — расчётная энтальпия наружного воздуха в ТП по параметрам «Б» из СП 131, кДж/кг; $d_{НБ}$ — его влагосодержание, вычисляемое, исходя из значений $t_{НБ}$ и $I_{НБ}$, г/кг; параметр 2,49 представляет собой удельную теплоту испарения воды [кДж/г], а 1,005 — удельную теплоёмкость сухого воздуха, кДж/(кг·K).

Имея в виду, что охлаждение притока в рекуператоре идёт по $d = \text{const}$, и учитывая (1), находим энтальпию притока $I_{п}$



и уходящего из помещения воздуха $I_{у}$, кДж/кг:

$$I_{п} = I_{НБ} - 1,005[k_{эф}(t_{НБ} - t_{о2}) + 0,5]; \quad (3)$$

$$I_{у} = 1,005t_{у} + 2,49d_{у}, \quad (4)$$

где $d_{у}$ — влагосодержание уходящего воздуха, г/кг; $t_{у}$ — его температура [°C], которая для кондиционируемых помещений в первом приближении обычно принимается на 1 °C выше температуры в рабочей зоне помещения $t_{в}$.

По определению углового коэффициента луча процесса в помещении $\epsilon_{пом}$ с учетом (4):

$$\epsilon_{пом} = \frac{1,005t_{у} + 2,49d_{у} - I_{п}}{d_{у} - d_{п}} 10^3. \quad (5)$$

Отсюда, очевидно:

$$d_{у} = \frac{\left(1,005t_{у} - I_{п}\right) 10^3}{\frac{\epsilon_{пом}}{1 - 2,49 \times 10^3} - \epsilon_{пом}}. \quad (6)$$

Используя выражение для температуры мокрого термометра через энтальпию влажного воздуха [12], находим:

$$t_{о2} = 4,47\sqrt{I_{у}} - 13,33. \quad (7)$$

Тогда, с учётом (4) и (6) и возводя обе части получаемого выражения в квадрат, после некоторых преобразований получаем искомое соотношение для $t_{о2}$:

$$t_{о2}^2 + bt_{о2} + c = 0, \quad (8)$$

где коэффициенты b и c вычисляются по формулам:

$$b = 26,66 + \frac{20 \times 1005 k_{эф}}{0,402 \epsilon_{пом} - 1000}, \quad (9)$$

$$c = 177,7 - 20 \times 1,005 t_{у} - \left\{ 20 \times \frac{\frac{I_{НБ} - 1,005 t_{НБ}}{2,49} + 20 \times \frac{10^3}{0,402 - \frac{10^3}{\epsilon_{пом}}}}{\left[\frac{1,005 t_{у} - I_{п} + 1,005 \times (k_{эф} t_{НБ} + 0,5)}{\epsilon_{пом}} \right] \times 10^3} \right\} \times \frac{10^3}{0,402 - \frac{10^3}{\epsilon_{пом}}}, \quad (10)$$

(здесь $0,402 = 1/2,49$; $26,66 = 13,33 \times 2$; $177 = 13,33^2$; $20 = 4,47^2$).



▣ Параметры основных точек для процесса обработки воздуха

табл. 1

$t_{у}$, °C	c	$t_{о2}$, °C	$t_{п}$, °C	$\Delta t = t_{у} - t_{п}$, °C
23,0	-949	18,95	21,77	1,23
23,5	-962	19,14	21,90	1,60
24,0	-975	19,33	22,03	1,97
24,5	-989	19,52	22,16	2,34
25,0	-1002	19,71	22,29	2,71
25,5	-1015	19,90	22,41	3,09
26,0	-1029	20,09	22,54	3,46

Отсюда, очевидно, $t_{o2} = 0,5 \left(-b + \sqrt{b^2 - 4c} \right)$ после чего, при необходимости, величину t_n можно найти по выражению (1). Данный алгоритм достаточно просто реализуется с помощью электронных таблиц Excel.

В качестве примера приведём результаты многовариантных расчётов по полученной методике для климатических условий Москвы: $\mathbf{H}_B$ (наружный воздух по параметрам «Б»): температура $t_{H_B} = +26^\circ\text{C}$, энтальпия $I_{H_B} = 54,4$ кДж/кг по СП 131; при значении $\epsilon_{\text{пом}} = 10000$ кДж/кг и среднем коэффициенте температурной эффективности пластинчатого теплообменника $k_{\text{эф}} = 0,67$ находим $b = 31,12$. После этого, задаваясь величиной t_y в диапазоне от $+23$ до $+26^\circ\text{C}$ в соответствии с возможным уровнем t_B в пределах от $+22$ до $+25^\circ\text{C}$, получаем значения остальных интересующих нас параметров, приведённые в табл. 1.

Очевидно, что, чем выше выбранная величина t_B и чем она ближе к верхнему пределу оптимального диапазона для ТП в соответствии с требованиями ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях», тем больше получается достигаемая разность температур притока и уходящего воздуха $t_y - t_n$ и, следовательно, тем меньше будет требуемый воздухообмен в помещении для ассимиляции тепловлагодоступлений. Поэтому при использовании предлагаемой схемы обработки воздуха в ТП параметры внутреннего микроклимата следует принимать на максимально возможном уровне, допускаемом условиями комфортности.

Таким образом, разработанная методика действительно позволяет проводить аналитическую оценку состояния воздуха в основных точках процесса обработки притока с косвенным испарительным охлаждением в пластинчатом рекуператоре в ТП и проводить многовариантные расчёты с целью выявления оптимальных режимов функционирования схемы и возможности её применения в различных климатических условиях. При этом она имеет достаточно простой вид и доступна для использования в практике проектирования климатических систем. ●

1. Савичев К.Д., Глухов В.В. Влияние энергоёмкости ВВП на качество жизни: показатели оценки и методы государственной поддержки // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки, 2018. Т. 11. №1. С. 77–86.
2. Бобылев С.Н., Аверченков А.А., Соловьёва С.Н., Кирюшин П.А. Энергоэффективность и устойчивое развитие. — М.: Институт устойчивого развития / Центр экологической политики России, 2010. 148 с.
3. Тишков С.В., Щербак А.П. Энергоэффективность и энергосбережение как основные факторы экономического развития России // Институциональная трансформация экономики: российский вектор новой индустриализации: Мат. IV Межд. научн. конф. (Омск, 21–23.10.2015). — Омск, 2015. С. 298–303.
4. Андреева Е.В., Клепиков В.И. Интеграция зарубежных рынков электроэнергетики. — М.: Ассоциация «НП совет рынка», 2017. 121 с.
5. Кузнецова А.Р., Сайтова Р.З., Ахметьянова А.И. Проблемы развития науки в современных условиях в Российской Федерации // Российский электронный научный журнал, 2016. №2. С. 189–203.
6. Окрепилов В.В., Леонова Т.И. Модели оптимизации в экономике качества // Экономическая наука современной России, 2016. №4. С. 22–29.
7. Fereidoon P. Sioshansi, Pfaffenger W. Electricity Market Reform: An International Perspective. 1st Edition. Elsevier Science. 2006. 688 p.
8. Cheng S., Chen M. Multi-objective reactive power optimization strategy for distribution system with penetration of distributed generation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2014. No. 10. Pp. 221–228.
9. Богословский В.Н. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: Учебник для вузов / В.Н. Богословский, О.Я. Кокорин, Л.В. Петров; Под ред. В.Н. Богословского. — М.: Стройиздат, 1985. 367 с.
10. Самарин О.Д., Лушин К.И., Кирушок Д.А. Энергосберегающая схема обработки воздуха с косвенным испарительным охлаждением в пластинчатых рекуператорах // Жилищное строительство, 2018. №1–2. С. 43–45.
11. Самарин О.Д., Кирушок Д.А. Оценка параметров наружного климата для обработки воздуха с косвенным испарительным охлаждением в пластинчатых рекуператорах // Жилищное строительство, 2018. №4. С. 41–43.
12. Самарин О.Д. Основы обеспечения микроклимата зданий. — М.: Изд-во АСВ, 2014. 208 с.

Analytical calculation of parameters of the humid air state in a special flow processing scheme. Pp. 36–39.

Oleg D. Samarin, PhD, Associate Professor; **Dmitry A. Kirushok**, postgraduate student, lecturer, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

1. K.D. Savichev, V.V. Gluhov. *Vliyanie jenergoemkosti VVP na kachestvo zhizni: pokazateli ochenki i metody gosudarstvennoj podderzhki* [The impact of energy intensity of GDP on quality of life: assessment indicators and methods of state support]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Jekonomicheskie nauki* [Scientific and technical statements of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). Economics]. 2018. Vol. 11. No. 1. Pp. 77–86. [In Russian]
2. S.N. Bobylev, A.A. Averchenkov, S.N. Solov'eva, P.A. Kirjushin. *Jenergojeffektivnost' i us-tojchivoe razvitiye* [Energy efficiency and sustainable development]. Moscow. *Institut us-tojchivogo razvitiya. Centr jekologicheskoy politiki Rossii* [Institute for Sustainable Development. Center for Environmental Policy of Russia]. 2010. 148 p. [In Russian]
3. S.V. Tishkov, A.P. Shherbak. *Jenergojeffektivnost' i jenergosberezhenie kak osnovnye faktory jekonomicheskogo razvitiya Rossii* [energy efficiency and energy saving as the main factors of Russia's economic development]. *Institucional'naja transformacija jekonomiki: rossijskij vektor novoy industrializacii: Mat. IV Mezhd. nauchn. konf.* [Institutional transformation of the economy: the Russian vector of new industrialization: Proc. of the IV International Scientific Conference] (Omsk, October 21–23, 2015). Omsk. 2015. Pp. 298–303. [In Russian]
4. E.V. Andreeva, V.I. Klepikov. *Integracija zarubezhnyh rynkov jelektroenergii* [Integration of foreign electricity markets]. Moscow. *Associacija "NP sovet rynka"* [The "NP Market Council" Association]. 2017. 121 p. [In Russian]
5. A.R. Kuznecova, R.Z. Saitova, A.I. Ahmet'janova. *Problemy razvitiya nauki v sovremennyh uslovijah v Rossijskoj Federacii* [Problems of the development of science in modern conditions in the Russian Federation]. *Rossijskij jelektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian electronic scientific journal]. 2016. No. 2. Pp. 189–203. [In Russian]
6. V.V. Okrepilov, T.I. Leonova. *Modeli optimizacii v jekonomike kachestva* [Optimization models in the economy of quality]. *Jekonomicheskaja nauka sovremennoj Rossii* ["The economic science of modern Russia" Magazine]. 2016. No. 4. Pp. 22–29. [In Russian]
7. Fereidoon P. Sioshansi, Pfaffenberger W. *Electricity Market Reform: An International Perspective*. 1st Edition. Elsevier Science. 2006. 688 p.
8. S. Cheng, M. Chen. Multi-objective reactive power optimization strategy for distribution system with penetration of distributed generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014. No. 10. Pp. 221–228.
9. V.N. Bogoslovskij. *Kondicionirovanie vozduha i holodosnabzhenie: Uchebnik dlja vuzov* [Air conditioning and cooling: A textbook for universities]. V.N. Bogoslovskij, O.Ja. Kokorin, L.V. Petrov; Edited by V.N. Bogoslovskij. Moscow. *Strojizdat* [Publishing House of literature on the construction and architecture of the USSR ("Strojizdat" Publishers)]. 1985. 367 p. [In Russian]
10. O.D. Samarin, K.I. Lushin, D.A. Kirushok. *Jenergosberegajushhaja shema obrabotki vozduha s kosvennym isparitel'nyim ohlazhdeniem v plastinchatyh rekuperatorah* [Energy saving scheme of air treatment with indirect evaporative cooling in plate heat recovery units]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* ["Residential construction" Magazine]. 2018. No. 1–2. Pp. 43–45. [In Russian]
11. O.D. Samarin, D.A. Kirushok. *Ocenka parametrov naruzhnogo klimata dlja obrabotki vozduha s kosvennym isparitel'nyim ohlazhdeniem v plastinchatyh rekuperatorah* [Estimation of external climatic parameters for air treatment with indirect evaporative cooling in plate heat recovery units]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* ["Residential construction" Magazine]. 2018. No. 4. Pp. 41–43. [In Russian]
12. O.D. Samarin. *Osnovy obespechenija mikroklimata zdaniy* [Fundamentals of building microclimate maintenance]. Moscow. *Izd-vo ASV* [Publishing House of the Association of Construction Universities]. 2014. 208 p. [In Russian]