УДК 697.957

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-164-170

© В. Р. Таурит, д-р техн. наук, профессор
© И. И. Суханова, канд. техн. наук, доцент
© А. Н. Колосницын, старший преподаватель
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: taurit_v_r@mail.ru

© V. R. Taurit, Dr. Sci. Tech., Professor
© I. I. Sukhanova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© A. N. Kolosnitsyn, senior lecturer
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: taurit_v_r@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НИСПАДАЮЩИХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТРУЙ ДЛЯ КАНАЛЬНОЙ КОМПАКТНОЙ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

STUDY BY THE NUMERICAL METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF FALLING VENTILATION JETS FOR A CHANNEL COMPACT AIR CONDITIONING SYSTEM

Решена задача по существенному снижению расхода вентиляционного воздуха в канальных системах кондиционирования за счет оптимизации показателей эффективности воздухораспределителя. Численным методом экспериментально исследованы нетрадиционные ниспадающие неизотермические струи с выявлением особенностей их структуры и определением расчетных коэффициентов m и n по предложенной методологии. Иллюстрируются возможности снижения энергозатрат за счет увеличения начальной разности температур приточного воздуха.

Ключевые слова: вентиляция, ниспадающие струи, структура, численный метод, моделирование, расчет, показатели эффективности, расход воздуха, энергозатраты, кондиционирование.

The problem of significantly reducing the consumption of ventilation air in ducted air conditioning systems by optimizing the efficiency of the air distributor is solved. Unconventional falling non-isothermal jets are experimentally investigated by numerical method with the identification of the structure features and determination of the calculated coefficients m and n according to the proposed methodology. The possibilities of reducing energy consumption by increasing the initial temperature difference of the supply duct air are shown.

Keywords: ventilation, falling jets, structure, numerical method, modeling, calculation, efficiency indicators, air consumption, energy consumption, air conditioning.

Для формирования нормируемых параметров микроклимата в помещениях современных общественных зданий широко используется канальная компактная вентиляция. При этом для подачи свежего воздуха в помещения применяются малогабаритные воздухораспределители, разработанные на известных в области вентиляционной техники принципах их конструирования.

В служебных помещениях, высота которых, как правило, ограничивается 3–4 м, а санитарно-

гигиенические требования к параметрам микроклимата (скорость, перепад температур) на рабочих местах достаточно высокие, возникает проблема снижения расхода подаваемого воздуха. В этом плане коэффициенты эффективности существующих воздухораспределителей m и n имеют определенные ограничения [1, 2, 3], что не позволяет закладывать в проект кондиционирования более высокую разность температур приточного воздуха Δt_0 , °C. Наибольшими воз-

возможностями гибко изменять аэродинамические и теплофизические показатели вертикальной ниспадающей струи обладают перфорированные поверхности воздуховода, панели или плоской решетки.

Систематизация, анализ и обобщение сведений по закономерностям формирования и развития струй, истекающих через перфорированные поверхности воздухохораспределителей, выполнены М. И. Гримитлиным [4, 5], основываясь на результатах личных исследований и данных других авторов [6, 7, 8]. Полученные ими новые научные и конструктивные разработки широко используются в объемных помещениях промышленных зданий, когда требуется обеспечить нормируемые санитарно-гигиенические условия в рабочей зоне при большом воздухообмене.

Традиционная схема истечения воздуха из перфорированных отверстий включает дополнительный участок формирования, в пределах которого отдельные многочисленные струйки, взаимодействуя между собой, образуют сплошной однородный поток. За пределами участка формирования образуется осесимметричная струя. Из этого следует, что для решения задачи по оптимизации качественных характеристик рассматриваемых струй следует изучить особенности влияния на их эффективность начальных условий истечения.

В качестве объекта исследования приняты перфорированные решетки квадратной формы, размеры которых рекомендуются литературой для канальной вентиляции [1]. Приведенные в ней значения расчетных коэффициентов $m = 2,1$ и $n = 1,7$ характерны для группы рассеянных струй и не обосновываются специальными исследованиями их структуры на участке формирования в зависимости от конструктивных параметров перфорированной решетки.

Авторами статьи изучалось влияние конструктивных параметров отдельной решетки на сложные процессы взаимодействия друг с другом истекающих струек и с окружающей средой модуля помещения (рис. 1), а также влияние этих процессов на формирование поля скорости и температуры в ниспадающем потоке. При этом были выполнены условия нормального истечения воздуха из отверстий решетки (коэффици-

ент расхода отверстия $\mu = 1$) и для образования свободной струи [5, 8].

Связь между основными конструктивными параметрами перфорированной поверхности — диаметром отверстий d_0 , мм, с шагом t , мм, и с коэффициентом живого сечения решетки $K_{ж.с}$ — определяется известной зависимостью

$$t = 0,89 \frac{d_0}{\sqrt{K_{ж.с}}} \quad (1)$$

С уменьшением диаметра d_0 возрастает эжекционная способность струек, а при уменьшении шага до значений $t < 4 \cdot d_0$ струйки быстро сливаются в общий поток [3, 5]. Следовательно, для увеличения начальной разности температур Δt_0 и снижения за счет этого расхода подаваемого воздуха целесообразно иметь минимальные значения d_0 и шаг $t > 4 \cdot d_0$. Для небольших расходов воздуха, подаваемого вентиляцией в обществен-

Рис. 1. Модуль вентилируемого помещения:
1 — приточная перфорированная квадратная решетка;
2 — вытяжные отверстия; 3 — камера статического давления

ных зданиях, принимаем решетку с оптимальными параметрами $d_0 = 3$ мм и $t = 5 \cdot d_0$, мм.

Установлено также, что на снижение скорости w_x , м/с, и избыточной температуры Δt_x , °С, на оси струи в большой степени оказывает влияние $K_{ж.с}$. Эти зависимости на расчетном основном участке неизоэтермической струи описываются уравнениями [4, 6]

$$w_x = K_w w_0 \sqrt{K_{ж.с}} \frac{b}{x} K_n; \quad (2)$$

$$\Delta t_x = K_t \Delta t_0 \sqrt{K_{ж.с}} \frac{b}{x} \frac{1}{K_n}, \quad (3)$$

где b — размер стороны решетки, м; $x(y)$ — расстояние от решетки, м; $\Delta t_x = t_x - t_0$; t_x , t_0 — температура воздуха на оси струи и в отверстиях решетки соответственно, °С; K_w , K_t — коэффициенты, учитывающие особенности начальных условий истечения струи; K_n — коэффициент неизоэтермичности струи.

При оптимальных принятых значениях d_0 и t из (1) определяется и оптимальное значение $K_{ж.с} = 0,05$.

При низком коэффициенте $K_{ж.с} < 0,1$ и увеличении расстояния между отверстиями до значений $t \geq 5 \cdot d_0$ улучшаются условия прироста массы потока на участке формирования, а его кинетическая энергия в основном расходуется на увеличение массы. При этом вблизи приточной решетки количество движения (mw) уменьшается, а статическое давление имеет отрицательные значения [5].

Суждения о влиянии начальных условий истечения струи на процесс ее формирования противоречивы, так как K_w в уравнении (1), по данным зарубежной литературы, может изменяться в достаточно широком диапазоне — от 2,3 до 4,5 [5]. Со временем также выясняется, что эжекционная способность струек и количество движения потока для каждого $K_{ж.с}$ могут изменяться также от числа отверстий решетки n , то есть от числа рядов отверстий $\sqrt{n}$.

При минимальном значении $K_{ж.с} = 0,05$ количество движения на участке формирования перестает уменьшаться при $\sqrt{n} > 26$ [4]. При стороне квадратной решетки $b = 0,45$ м, и оптимальных экспериментальных значениях t и d_0 , число рядов отверстий $\sqrt{n} = 30$ ($n = 900$), что больше 26.

Таким образом, при проектировании вентиляции для определения оптимальных расчетных

значений скорости w_x и избыточной температуры Δt_x на оси струи требуется знать структуру исследуемой струи при выбранных начальных условиях истечения, пределы расположения в струе расчетного основного участка, а также значения коэффициентов K_w и K_t . В уравнениях (1) и (2) значения w_0 , м/с, и Δt_0 , °С, выявляются при определении проектного расхода подаваемого воздуха. По акустическим соображениям для служебных помещений рекомендуется принимать скорость $w_0 = 1,5$ –2 м/с. Выбор минимально возможной начальной разности температур обосновывается ниже.

Изучать сложные физические процессы образования поля скоростей и температур на участках формирования и развития струи достаточно сложно, если даже установлены оптимальные конструктивные параметры перфорированной решетки. Так, исследования на физической модели не могут быть выполнены в связи с отсутствием современной специальной технологии по измерительной технике и большой трудоемкостью работ. Для решения поставленной задачи применены перспективные численные методы исследования, основанные на математическом моделировании процессов [9, 10].

Размеры объекта исследования (модуль помещения) приняты: $B = 2,5$ м, $h = 4$ м (см. рис. 1). Конструктивные параметры перфорированной квадратной решетки 1 имеют оптимальные размеры: $b = 450$ мм, $d_0 = 3$ мм, $t = 5 \cdot d_0$ мм, $K_{ж.с} = 0,05$, $\sqrt{n} = 30$. Схема вентиляции принята «сверху-вниз» с удалением воздуха из нижней зоны через симметрично расположенные отверстия 2. Скорость истечения воздуха из отверстий решетки $w_0 = 2$ м/с. Явная теплота поступает в помещение и равномерно распределяется по объему, ее количество соответствует начальной разности температур $\Delta t_0 = 3,5$ °С.

Решается задача изучения процессов формирования поля скоростей и температур в потоке при истечении в помещение через перфорированную решетку с обоснованными конструктивными параметрами. При численном решении задачи базовая система дифференциальных уравнений включала уравнения неразрывности, движения Навье–Стокса в осреднении Рейнольдса, энергии [9, 10]. Для обоснования сложных начальных условий истечения потока на первом

этапе работы использовались три модификации модели турбулентности: $k-w$ sst с ламинарным подслоем, $k-e$ — кубическая и $k-e$ — квадратичная. В качестве окончательной принята модель $k-w$ sst с ламинарным подслоем, показавшая наилучшую сходимость по коэффициенту K_w (2). Параметры w_y и t_y , полученные из данной модели, отличаются от других моделей турбулентности в пределах 9 %. В расчетах использовался сертифицированный программный комплекс Simcenter STAR CCM+.

Результаты расчета численным методом скорости и температуры в вертикальном сечении модуля помещения представлены на рис. 2 — максимальные значения параметров на оси струи и на рис. 3 — поля скорости и температуры. Из сопоставления представленных сведений по формированию и развитию ниспадающей струи можно установить ее структуру и характерные участки для определения максимальных расчетных параметров w_y и t_y ($\Delta t_y = t_y - t_0$) на оси потока.

При истечении отдельных струек из отверстий возникает сложный процесс образования сплошного потока. Процесс сопровождается уменьшением кинетической энергии и изменением потенциальной. Внутренняя область при истечении струек из отверстий образует ламинарный слой, в котором относительная скорость

w_y/w_0 снижается с 1 до 0,15. По периметру решетки образуется внешняя область струи, размеры которой уменьшаются в результате сужения потока под воздействием разности статических давлений снаружи и внутри струи (рис. 3, а).

Сплошная струя с неравномерным профилем скорости образуется на расстоянии $y = b$. На втором участке относительная скорость w_y/w_0 постепенно увеличивается, затем она остается неизменной, равной 0,25 в пределах расстояния $y = (2,2-4,0)b$. При значениях $y > 4b$ образуется расчетный основной участок, где осевая скорость постепенно снижается до значения $w_y = 0,18w_0$ в сечении $y = 6b$. В нижней части струи на расстоянии $y < 3$ м возникает процесс торможения потока при набегании на поверхность [11]. Поэтому на этом участке температура на оси струи t_y изменяется незначительно (рис. 2, б).

По данным численного эксперимента определяются коэффициенты K_w и K_t в уравнениях (2), (3). Коэффициент неизотермичности струи K_n вычисляется при известных параметрах x/b , $K_{ж.с.}$, w_0 и Δt_0 [6].

Численное значение коэффициента пропорциональности $K_w = 4,3$ соответствует литературным данным [4] и остается практически неизменным (рис. 4) в пределах расчетного расстояния $x(y) = (4-6)b$. При известных значениях $K_{ж.с.}$ и K_n из (2) определяется также и темп падения

Рис. 2. Изменение скорости w_y (а) и температуры t_y (б) (далее — w_x , t_x) на оси исследуемой неизотермической струи по результатам численного эксперимента на модуле помещения (рис. 1, сеч. 1–1); $y(x)$ — расстояние от решетки, м; h — высота помещения, м

Рис. 3. Поле скорости, м/с (а) и температуры, °С (б) на участках формирования и развития неизомермической струи по высоте помещения

скорости, значения которого (рис. 5) соответствуют уравнению

$$m = \frac{w_x}{w_0} \frac{x}{b}. \quad (4)$$

Применение численного метода исследования позволяет аналогично вычислить коэффициент K_p , а следовательно, и требуемый коэффициент выравнивания температур на оси струи n (рис. 5). При этом будет обеспечиваться санитарно-гигиеническая разность температур Δt_x на входе струи в обитаемую зону:

$$\Delta t_x = n \Delta t_0 \frac{b}{x}. \quad (5)$$

В отличие от темпа падения скорости m значения коэффициента n ниже на всем расчетном участке струи. Их качественно-количественные характеристики ($m = 1,0$; $n < 1,0$) намного лучше, чем рекомендуется литературой для проектирования — $m = 2,1$; $n = 1,7$ [1]. По этим показателям предлагаемая в статье оптимальная конструкция перфорированной решетки по эффективности мало отличается от лучшего образца воздухо-

Рис. 4. Значения коэффициента K_w при изменении осевой относительной скорости на расчетном основном участке исследованной неизомермической струи

Рис. 5. Показатели эффективности изменения скорости m и температуры n на оси неизоотермической струи в пределах расчетного основного участка

распределителя типа «генератор комфорта» (с автоколебанием воздуха на истечении), который рекомендуется для отдельных кабинетов [9].

Полученные показатели эффективности разработанного воздухораспределителя могут быть использованы для проектирования систем вентиляции и кондиционирования в помещениях высотой $h \geq 3$ м при расстоянии до зоны обитания не менее 1,5 м. Предлагаемый узкий диапазон скорости w_0 в отверстиях и неизменность структуры формирования и развития струи позволяют считать, что принятая в статье методология определения относительных значений скорости w_x/w_0 и температуры $\Delta t_x/\Delta t_0$ достаточно корректна.

На примере рис. 6 иллюстрируются возможности увеличения разности начальных температур Δt_0 в зависимости от допустимого отклонения температуры Δt_x в обитаемой зоне. Результаты расчета получены при указанных в статье исходных данных для численного эксперимента в сечении струи на расстоянии $x = 5,55b$ (2,5 м) от воздухораспределителя. Реализация оптимальной конструкции перфорированной решетки в системе кондиционирования воздуха позволяет в разы увеличить Δt_0 и тем самым резко снизить энергоемкость системы за счет уменьшения проектного расхода подаваемого воздуха.

Численный эксперимент предполагается продолжить в направлении изучения влияния осо-

Рис. 6. Зависимость разности начальных температур Δt_0 от допустимого отклонения температуры Δt_x на оси струи на уровне $x = 5,5b$

бенностей организации воздухообмена в помещении общественного здания на качество микроклимата и свежесть воздуха в обитаемой зоне.

Выводы

1. Установлены оптимальные конструктивные параметры для плоской перфорированной решетки для снижения энергоемкости систем канальной компактной вентиляции.
2. Обоснована численная модель, принятая в экспериментальном исследовании.
3. Выявлены особенности образования, развития и структуры исследуемой ниспадающей неизоотермической струи.
4. Предлагается методология определения расчетных коэффициентов, позволяющих оценить санитарно-гигиенические и энергетические показатели исследуемой вентиляционной решетки оптимальной конструкции.
5. Полученные показатели эффективности нетрадиционной струи превосходят аналоги и могут быть использованы для существенного снижения расхода подаваемого воздуха в системах кондиционирования.

Библиографический список

1. Воздухораспределители компании «Арктос». Указания по расчету и практическому применению / Л. Я. Баландина и др. 5-е изд. СПб., 2008. 215 с.
2. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях. 3-е изд. СПб.: АВОК С-3, 2004. 320 с.

3. Таурит В. Р., Васильев В. Ф. Вентиляция в гражданских зданиях. Проектирование. СПб.: АНТТ-Принт, 2008. 147 с.

4. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях. 2-е изд. СПб.: НПП «Экоюрус – Венто», 1994. 315 с.

5. Гримитлин М. И. Раздача воздуха через перфорированные воздухопроводы. Л.: ЛИОТ, 1960. 188 с.

6. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха; под ред. Н. Н. Павлова. Кн. 2. М.: Стройиздат, 1992. 319 с.

7. Таурит В. Р. Раздача воздуха в судовых системах кондиционирования через перфорированные панели // Материалы конференции «Энергосбережение и кондиционирование воздуха на транспорте». Рига: Зинате, 1965. С. 12–15.

8. Посохин В. Н. Аэродинамика вентиляции. М.: АВОК-Пресс, 2008. 209 с.

9. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Дентсихина Д. М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. СПб.: АВОК-СЗ, 2013. 190 с.

10. Уляшева В. М. Совершенствование методов расчета тепловоздушных процессов на объектах транспортировки газа. СПб.: СПбГАСУ, 2011. 168 с.

11. Таурит В. Р., Кorableva Н. А. Исследование турбулентных воздушных течений в вентилируемом помещении методом численного моделирования // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2 (37). С. 157–161.

References

1. Balandina L. Ya., et al. *Vozdukhораспределители компании «Arktos». Ukazaniya po raschetu i prakticheskomu primeneniyu* [Air distributors of the company “ARKTOS”. Guidance on the calculation and the practical application]. 5-th ed. St. Petersburg, 2008, 215 p.

2. Gritmitlin M. I. *Raspredelenie vozdukha v pomeshcheniyakh* [Distribution of indoor air]. 3-rd ed. St. Petersburg, AVOK S-Z Publ., 2004, 320 p.

3. Taurit V. R., Vasil'ev V. F. *Ventilyatsiya v grazhdanskikh zdaniyakh. Proektirovanie* [Ventilation

in civil buildings. Designing]. St. Petersburg, ANTT-Print Publ., 2008, 147 p.

4. Gritmitlin M. I. *Raspredelenie vozdukha v pomeshcheniyakh* [Distribution of indoor air in premises]. 2-nd ed. St. Petersburg, Ekoyurus – Vento Publ., 1994, 315 p.

5. Gritmitlin M. I. *Razdacha vozdukha cherez perforirovannye vozdukhoprovy* [Distribution of air through perforated air ducts]. Leningrad, LIOT Publ., 1960, 188 p.

6. *Vnutrennie sanitarno-tekhnicheskie ustroystva. Ch. 3. Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha* [Internal sanitary devices. Part 3. Ventilation and air conditioning]. Ed. by Pavlova N. N. Pt. 2. Moscow, Stroyizdat Publ., 1992, 319 p.

7. Taurit V. R. *Razdacha vozdukha v sudovykh sistemakh konditsionirovaniya cherez perforirovannye paneli* [Distribution of air in ship air conditioning systems through perforated panels]. *Trudy konferentsii «Energoberezhenie i konditsionirovanie vozdukha na transporte»* [Proceedings of the conference “Energy saving and air conditioning in transport”]. Riga, Zinate Publ., 1965, pp. 12–15.

8. Posokhin V. N. *Aerodinamika ventilyatsii* [Aerodynamics of ventilation]. Moscow, AVOK-Press Publ., 2008, 209 p.

9. Gritmitlin A. M., Datsyuk T. A., Dentsikhina D. M. *Matematicheskoe modelirovanie v proektirovani sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya* [Mathematical modeling in the design of ventilation and air conditioning systems]. St. Petersburg, AVOK-SZ Publ., 2013, 190 p.

10. Ulyasheva V. M. *Sovershenstvovanie metodov rascheta teplovozdukhnykh protsessov na ob'ektakh transportirovki gaza* [Improvement of methods for calculating heat-air processes at gas transportation facilities]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2011, 168 p.

11. Taurit V. R., Korableva N. A. *Issledovanie turbulentnykh vozdukhnykh techeniy v ventiliruemom pomeshchenii metodom chislennogo modelirovaniya* [Research of turbulent air flows in ventilated premises by the numerical simulation method]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 2 (37), pp. 157–161.