

Моделирование процессов тепломассопереноса в приточных неизотермических струях

Е. В. БУЗИН

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

The paper is devoted to simulation of non-isothermal jets produced in personal air treatment and supply devices. The investigation is aimed at construction of maximum accurate and pictorial model to calculate coordinates and thermal physical parameters of the supply jet in any point of the space.

В современном кондиционировании воздуха весьма перспективным направлением представляется создание персональных приборов обработки и раздачи воздуха [1]. Экспериментальные исследования, широко проводимые сегодня во всем мире, демонстрируют высокую эффективность и экономическую привлекательность создания подобного рода систем [2].

Персональное кондиционирование посредством воздействия воздушных течений будет формировать в зоне дыхания человека локальный микроклимат. При этом особенно жесткие требования будут предъявляться к соблюдению комфортных параметров последнего. Однако на сегодняшний день для оценки характера изменения теплофизических параметров воздуха по течению струи применяются лишь упрощенные зависимости, не обеспечивающие приемлемую точность практических расчетов [3].

Созданная нами математическая модель, в основу которой легли известные фундаментальные зависимости аэродинамики (уравнения Бернулли, неразрывности потока и уравнения движения Навье–Стокса), рассматривает определение траектории струи в пространстве, расчет температуры, влажности и скорости воздуха в любой точке струи, а также количество подмешанного окружающего воздуха.

Для описания траектории воздушной неизотермической струи, выпущенной под некоторым углом θ_0 к горизонту, исследована зависимость [3]

$$y(s) = s \sin \theta_0 + 0,032 R_0 \text{Ar} \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{окр}}}} \left(\frac{S}{R_0} \right)^3. \quad (1)$$

Здесь s — расстояние, пройденное по оси струи до точки с абсциссой x . Функционально параметр s связан с расстоянием x от выходного отверстия струи и определяется длиной дуги на графике функции искривления оси струи $y = y(x)$.

$$s(y(x)) = \int_0^1 \sqrt{1 + (y'(x))^2} dx. \quad (2)$$

Функцию $y(x)$ мы определили предварительным упрощением $s = x / \cos \alpha$ как для изотермической струи. Избежать погрешности удалось путем использования метода последовательных приближений $y(x)$ к своему истинному значению.

В существующие расчетные зависимости для определения параметров неизотермических приточных струй критерий Архимеда Ar входит как фактор, имеющий постоянное значение, что крайне некорректно. Реальное значение критерия Архимеда должно стать функцией

$$\text{Ar}(x) = 9,8 R_0 \frac{\Delta t(x)}{T_{\text{окр}} V_0^2}. \quad (3)$$

В свою очередь, входящая в формулу величина $\Delta t(x)$ (изменение разности температур между окружающим и приточным воздухом) сама является функцией параметра неизотермичности струи

$$\Delta t(x) = R_0 \frac{9,24}{s(x)} \sqrt{\frac{T_{\text{окр}}}{T_0} \frac{1}{K}} \Delta t_0, \quad (4)$$

где K — количество движения в струе

$$\sqrt{K} = \left(\cos^2 \theta_0 + \left(0,096 \text{Ar}(x) \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{окр}}}} R_0 s(x)^2 + \sin \theta_0 \right)^2 \right)^{0,25}. \quad (5)$$

Таким образом, реальная величина $\text{Ar}(x)$ определится методом последовательных приближений, при этом исходным значением будет фактор Ar , определенный через Δt_0 .

Основной задачей, которая обычно ставится при проектировании вентиляции, является определение такой

траектории струи, которая в заданной точке или области пространства имела бы требуемые физические параметры. В этом случае необходимо решать задачу, обратную рассмотренной, когда в качестве исходных данных выступают именно координаты точки воздушной струи, а результатом расчетов является нахождение начального угла наклона струи к горизонту. Последний определяется решением исходного уравнения для определения траектории струи относительно α .

Для расчета скорости воздуха в приточной струе и количества подмешиваемого окружающего воздуха определены соотношения

$$v = \frac{12,4}{s} R_0 v_0 \sqrt{\frac{T_{окр}}{T_0} K}, \quad (6)$$

$$L = 0,155 s L_0 R_0 \sqrt{\frac{T_{окр}}{T_0} K}. \quad (7)$$

Для иллюстрации созданной физической модели была разработана программная поддержка вычислений. Математическое обеспечение расчетов позволяет решать прямую и обратную задачи. В отличие от существующих моделей расчетные зависимости созданной модели являются сложными нелинейными функциями нескольких порядков, включающими множество параметров, которые, в свою очередь, сами являются функциональными зависимостями. И хотя структура модели значительно усложняется, она позволяет с высокой достоверностью описывать истинное поведение приточной струи.

Программное обеспечение расчетов позволило получить обширный материал для различных условий работы персонального кондиционера. Предусмотрена графическая интерпретация расчетов траектории струи и падения разности температур и скорости воздуха, причем как по оси струи, так и по ее сечению. Программа позволяет проводить расчеты и по традиционно используемым зависимостям для возможности сравнения получаемых значений с рассчитываемыми по уточненной методике.

На рис. 1 представлены траектории оси струи, полученные в результате работы программы при определенном наборе исходных данных.

Анализ расчетных данных показывает, что применение разработанной модели позволяет уточнить траекторию приточной неизотермической струи более чем на 20 % для расстояний от воздухораспределительного устройства порядка 0,7–1,0 м, характерных для персонального кондиционирования. Особенно справедливым это оказывается для струй, сильно неизотермичных (с начальной разностью температур более четырех градусов — см. таблицу).

В качестве иллюстрации расчетов на рис. 2 приведен график падения скорости воздуха на оси струи по мере удаления от выходного отверстия.

Падение разности температур между окружающим воздухом и воздухом на оси струи представлено на рис. 3. Горизонтальный участок соответствует начальному участку струи с постоянным ядром скоростей и температур.

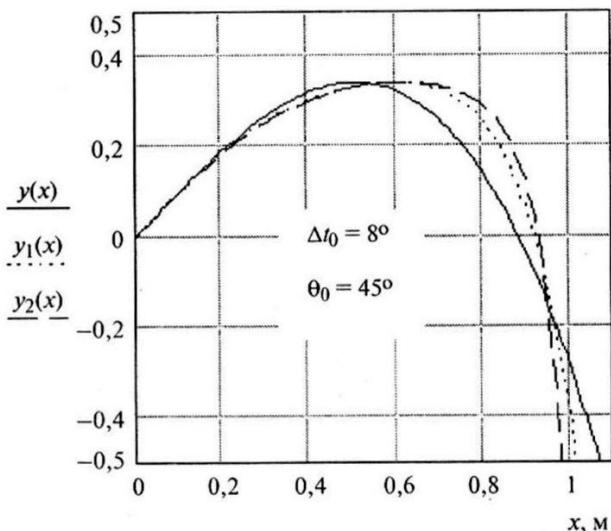


Рис. 1. Траектории приточной струи, построенные по традиционной $y(x)$ и уточненной зависимостям:
 $y_1(x)$ — в первом приближении;
 $y_2(x)$ — во втором приближении

Анализ расчетов траекторий струй различной неизотермичности

Координата $x, \text{ м}$	Уточнение $\varepsilon, \%$, для различных Δt_0		
	$\Delta t_0 = 2^\circ$	$\Delta t_0 = 4^\circ$	$\Delta t_0 = 10^\circ$
0	0	0	0
0,2	0,2	0,5	1,1
0,4	0,9	1,6	2,3
0,6	1,7	2,3	2,8
0,8	2,3	0,9	25,3
1,0	2,0	5,1	15,7
1,2	0	18,8	53,5

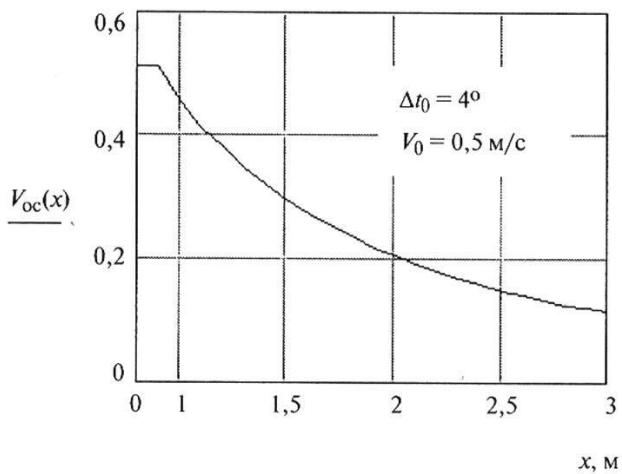


Рис. 2. Падение скорости воздуха в струе на ее оси

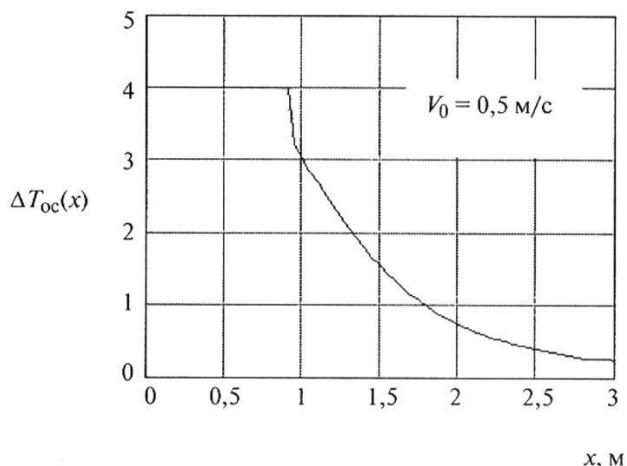


Рис. 3. Падение разности температур между окружающим и приточным воздухом

Для наглядного представления приточной струи воздуха в пространстве имеется возможность построения ее трехмерного изображения. Тем самым появляется возможность создавать графические модели, имитирующие реальные объекты — воздушный поток в зоне дыхания человека, находящегося за рабочим столом в помещении.

Созданная расчетная модель и программное обеспечение могут быть использованы как разработчиками персональных систем кондиционирования воздуха, так и проектировщиками систем вентиляции для решения задачи эффективного воздухораспределения.

Список литературы

1. Бузин Е. В., Булат Л. П. Персональный термоэлектрический охладитель—нагреватель воздуха // Материалы междунар. научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». — СПб.: СПбГУНиПТ, 2001.
2. Melikov A. K., Arakelian R. S., Halkjaer L., Fanger P. O. Spot cooling: Human responses to cooling with air jets, ASHRAE Transactions. 1993. Vol. 100. № 2.
3. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции. — М.: Стройиздат, 1979.