



Экспериментальные исследования неизотермической воздушной струи

К.В. Кочарьянц¹, И.Н. Тисленко¹

¹ООО «Арктос»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Расчет воздухораспределения - один из важнейших этапов проектирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха, от корректности которого во многом зависит формирование комфортного микроклимата. Большинство профильных специалистов осуществляют данный расчет с помощью инженерных методик. При этом использование методик различных авторов приводит к сильно отличающимся результатам. Цель работы: на основании экспериментальных исследований определить наиболее корректную методику расчета воздухораспределения неизотермическими струями, подаваемыми горизонтально. Задачи исследования: анализ и сопоставление расчетных формул наиболее часто применяемых методик для расчета неизотермических струй; проведение экспериментальных исследований приточной струи в неизотермических условиях на стенде научно-исследовательской лаборатории аэродинамики и акустики завода «Арктос» при различных параметрах на истечении; сравнение скорости, температуры и траектории приточных струй с результатами расчетов по инженерным методикам; анализ полученных результатов. На основании проведенного исследования установлено, что ни одна из общепринятых инженерных методик не позволяет корректно определить параметры неизотермической струи. Следовательно, необходимо проведение дальнейших исследований и совершенствование методов расчета воздухораспределения неизотермическими струями.

Ключевые слова: вентиляция, воздухораспределение, приточная струя, воздушное отопление, геометрическая характеристика, критерий Архимеда

Для цитирования: Кочарьянц К.В., Тисленко И.Н. Экспериментальные исследования неизотермической воздушной струи // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 6-16, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.1, EDN: BBPSR

Experimental studies of a non-isothermal air jet

K.V. Kocharyants¹, I.N. Tislenko¹

¹LLC "Arktos",

St. Petersburg, Russian Federation

Abstract: The calculation of air distribution is one of the most important stages in the design of ventilation and air conditioning systems, the correctness of which largely determines the formation of a comfortable microclimate. Most subject matter experts carry out this calculation using engineering methods. At the same time, the use of methods by different authors leads to very different results. The purpose of the work: based on experimental studies, to determine the most correct method for calculating air distribution by non-isothermal jets supplied horizontally. Research objectives: analysis and comparison of calculation formulas of the most commonly used methods for calculating non-isothermal jets; conducting experimental studies of the supply jet in non-isothermal conditions at the stand of the scientific research laboratory of Aerodynamics and acoustics of the Arktos plant at various parameters at the outlet; comparing the speed, temperature and trajectory of the supply jets with the results of calculations using

engineering methods; analysis the results obtained. Based on the conducted research, it was found that none of the generally accepted engineering methods allows correct determination of the parameters of a non-isothermal jet. Therefore, it is necessary to conduct further research and improve methods for calculating air distribution by non-isothermal jets.

Keywords: ventilation, air distribution, supply jet, air heating, geometric characteristic, Archimedes' criterion

For citation: Kocharyanc K.V., Tislenko I.N. Experimental investigations of a non-isothermal air jet // News KSUAE, 2024, 2024, № 2(68), p. 6-16, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.1, EDN: BBPSR

1. Введение

В последнее время все большее внимание уделяется поддержанию комфортного микроклимата в помещениях различного назначения [1-3]. Для его достижения требуется уже на этапе проектирования систем вентиляции уметь прогнозировать значения температуры и скорости воздуха в обслуживаемой зоне помещения [4-6]. Наиболее совершенным методом определения параметров микроклимата в настоящее время является численное моделирование процессов воздухораспределения [7-9], осуществляемое методами вычислительной гидродинамики [10-12]. Однако высокая стоимость и сложность применения данного метода делает его малодоступным в практике проектирования систем вентиляции. Поэтому основным способом прогнозирования параметров микроклимата остается применение инженерных методик.

В настоящий момент основным нормативным документом для проектировщиков систем вентиляции является СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», в приложении «Ж» которого представлена инженерная методика расчета воздухораспределения. Данная методика практически полностью заимствована из «Указаний по расчету и применению воздухораспределителей», которые разрабатывались специалистами научно-исследовательской лаборатории аэродинамики и акустики (НИЛАА) отечественного производителя воздухораспределителей завода «Арктос» на основе трудов советских [13, 14] и российских ученых [15, 16], а также на базе собственных исследований [17].

Как правило, методики расчета воздухораспределения разрабатываются на основе закономерностей развития приточных струй [18-20]. Наиболее сложным случаем является развитие неизотермических струй, которые применяются для воздушного отопления или кондиционирования воздуха [21, 22]. Основными авторами, описывающими поведение неизотермических струй, являются д.т.н. М.И.Гримитлин и д.т.н. И.А.Шепелев (формулы которого используются в методике СП 60.13330.2020). Характеристик струи, рассчитанные по различным методикам, в том числе указанных авторов, имеют кардинально различающиеся значения. При этом авторы используют в формулах различные параметры, что затрудняет сравнительный анализ их подходов к развитию неизотермических приточных струй.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы на основании экспериментальных исследований выявить наиболее корректную методику расчета воздухораспределения неизотермическими струями, подаваемыми горизонтально.

Задачами исследования являются:

- анализ и сопоставление формул наиболее часто применяемых методик для расчета неизотермических струй;
- проведение экспериментальных исследований приточной струи в неизотермических условиях на стенде научно-исследовательской лаборатории аэродинамики и акустики завода «Арктос» при различных параметрах на истечении;
- сравнение скорости, температуры и траектории приточных струй с результатами расчетов по инженерным методикам;
- анализ полученных данных.

2. Материалы и методы

На первом этапе описываемой работы авторами статьи был проведен анализ методик различных авторов, предлагаемых для расчета параметров неизолированной струи, а именно: траектории, максимальной скорости и избыточной температуры на различных расстояниях от истечения.

В [13] компактные неизолированные струи, называемые автором компактными воздушными фонтанами, предлагается описывать с помощью комплекса величин, имеющего размерность длины, называемого автором геометрической характеристикой:

$$H = \sqrt{\frac{m^2 T_{окр} V_0^2 \sqrt{F_0}}{n g \Delta T_0}} \quad (1)$$

где m – кинематический коэффициент; n – температурный коэффициент; $T_{окр}$ – температура окружающего воздуха; $\Delta T_0 = T_0 - T_{окр}$ – избыточная температура воздуха в момент истечения; T_0 – температура воздуха на истечении; F_0 – расчетная площадь воздухоораспределителя; $V_0 = L/F_0$ – скорость воздуха в расчетном сечении, здесь L – объемный расход приточного воздуха; g – ускорение свободного падения.

В [14] для описания неизолированной струи используется безразмерный комплекс величин, называемый критерием Архимеда Ar_0 , отнесенным к условиям на истечении:

$$Ar_0 = g \frac{\sqrt{F_0} \Delta T_0}{V_0^2 T_{окр}} \quad (2)$$

Кроме того в [14] используется текущий критерий Архимеда для осесимметричных и веерных струй, зависящий от расстояния от истечения x :

$$Ar_x = \frac{n}{m^2} Ar_0 \left(\frac{x}{\sqrt{F_0}} \right)^2 \quad (3)$$

Сравнивая (1) с (2) и (3) можно получить следующие соотношения между критериями Архимеда и геометрической характеристикой компактной струи:

$$Ar_0 = \frac{m^2 F_0}{n H^2} \quad (4)$$

$$Ar_x = \left(\frac{x}{H} \right)^2 \quad (5)$$

Геометрическая характеристика и критерий Архимеда используются различными авторами для определения траектории струи.

В [13] выводится следующая формула для траектории струи $y(x)$, т.е. для зависимости вертикальной координаты оси струи y от горизонтальной координаты оси струи x :

$$y = x \operatorname{tg} \alpha + \frac{n}{3m^2} \frac{g}{T_{окр}} \frac{\Delta T_0}{V_0^2 \sqrt{F_0}} \frac{x^3}{\cos^3 \alpha} = x \operatorname{tg} \alpha + \frac{x^3}{3H^2 \cos^3 \alpha} \quad (6)$$

Необходимо отметить, что формула (6) используется в методике СП 60.13330.2020.

В более поздней работе [14] приводится формула для траектории неизолированной струи при горизонтальной подаче:

$$\frac{y}{\sqrt{F_0}} = 0,6 \frac{n}{m^2} Ar_0 \left(\frac{x}{\sqrt{F_0}} \right)^3 \quad (7)$$

Сравним формулы (6) и (7). Для горизонтальной подачи ($\alpha = 0^\circ$) формула (6) примет вид

$$y = \frac{n}{3m^2} \frac{g}{T_{окр}} \frac{\Delta T_0 x^3}{V_0^2 \sqrt{F_0}} \quad (8)$$

После подстановки выражения (2) в (7) получим

$$y = 0,6 \frac{n}{m^2} \frac{g \Delta T_0}{T_{окр} V_0^2} \frac{x^3}{\sqrt{F_0}} \quad (9)$$

Сравнивая формулы (8) и (9), приходим к следующему выражению:

$$y = \frac{x^3}{\sqrt{F_0}} \frac{n}{m^2} \frac{g \Delta T_0}{T_{окр} V_0^2} \times \begin{cases} \frac{1}{3} - \text{Шепелев И. А.} \\ 0,6 - \text{Гримитлин М. И.} \end{cases} \quad (10)$$

Из (10) следует, что значения вертикального отклонения неизотермической компактной струи при горизонтальной подаче, вычисленные по формулам (6) и (7) различаются в 1,8 раз. Такое значительное отличие никак не комментируется в профильной литературе, что выглядит довольно странно, учитывая широкое применение неизотермических приточных струй в вентиляции. При этом в [16] приведено следующее выражение для определения траектории компактных и веерных струй

$$y = x \operatorname{tg} \alpha + 0,47 \frac{x^3}{3H^2 \cos^3 \alpha} \quad (11)$$

Из сравнения (11) с (10) следует, что для горизонтальной струи формула (11) дает значение y , равное среднему арифметическому значений, получаемых по формулам (6) и (7).

В свою очередь, автор [15], раскладывая в ряд решение выведенной им системы уравнений, описывающей траекторию неизотермической компактной струи, оставляет 4 первых члена ряда:

$$\bar{y} \approx \bar{t} \sin \alpha + \frac{\bar{t}^3}{3} + \frac{\sin \alpha}{12} \bar{t}^5 + \frac{41 + \cos 2\alpha}{2520} \bar{t}^7 \quad (12)$$

где $\bar{y} = \frac{y}{H}$, $\bar{t} = \frac{x}{H \cos \alpha}$.

При этом в [15] показано, что приближенное решение (12) мало отличается от численного решения системы уравнений при $-30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Сравнивая (12) с (6), получаем, что формула (6), приводимая автором [13], представляет собой два первых члена приближенного выражения (12). Таким образом, из [15] следует, что формула (6) – это довольно грубое приближение решения системы уравнений.

Рассмотрим подходы различных авторов для определения значений максимальной скорости по длине неизотермической струи.

В [13] предлагается уравнение для расчета максимальной скорости движения воздуха на оси компактной неизотермической струи, подаваемой под углом α к горизонту:

$$V_x = \frac{m V_0 \sqrt{F_0} \cos \alpha}{x} \sqrt{\cos^2 \alpha + \left[\sin \alpha + \left(\frac{x}{H \cos \alpha} \right)^2 \right]^2} \quad (13)$$

Такая же формула, выраженная через коэффициент неизотермичности K_n , указана и в [16] и приводится в СП 60.13330.2020.

Из анализа (13) следует, что для изотермической струи $\Delta T_0 = 0$, следовательно, учитывая (1), $H = \infty$. При этом подкоренное выражение (13) в силу основного тригонометрического тождества становится равным единице. В этом случае формула (13)

с учетом наклонной подачи трансформируется в стандартную формулу для изотермической компактной струи, являющуюся определением кинематического коэффициента m , что логично и не вызывает сомнений:

$$V_x = \frac{mV_0\sqrt{F_0}}{x} \quad (14)$$

Теперь рассмотрим (13) на больших расстояниях $x \gg H$. При этом подкоренное выражение становится прямопропорциональным x^4 . Следовательно, значение V_x пропорционально x . Таким образом, из (13) следует, что скорость компактной неизоэтермической струи на расстояниях $x \gg H$ неограниченно возрастает с расстоянием независимо от всех прочих параметров. Такой вывод вызывает сомнения и требует уточнения.

При подаче воздуха под углами, близкими к вертикальной подаче $\cos \alpha \rightarrow 0$, откуда следует, что подкоренное выражение (13) становится обратнопропорциональным $\cos^4 \alpha$. Следовательно, значение V_x обратнопропорционально $\cos \alpha$, т.е. $V_x \rightarrow \infty$. Таким образом, формула (13) приводит к неверным результатам при подаче воздуха под углами, близкими к вертикальной подаче, что также требует уточнения.

Также следует отметить, что автор [14], ссылаясь на данные экспериментов, предлагает V_x горизонтальных неизоэтермических струй определять по формулам изотермических струй. Данное утверждение противоречит уравнению (13).

Итак, проведенный анализ показал, что приведенное в СП 60.13330.2020 уравнение для определения максимальной скорости по длине неизоэтермической струи требует уточнения или, как минимум, определения области его применимости.

На втором этапе работы, с целью разрешения выявленных противоречий и совершенствования инженерных методик расчета воздухораспределения авторами была проведена серия натурных экспериментов по определению параметров неизоэтермической приточной струи, подаваемой горизонтально.

Исследования проводились на стенде НИЛАА завода «Арктос», представляющего собой помещение размерами $20 \times 12 \times 10$ м и предназначенного для измерений приточных струй в свободных условиях, исключая стеснение струи. Для формирования приточной струи была собрана экспериментальная установка, включающая в себя: вентилятор, нагреватель, управляемый лабораторным автотрансформатором (380 В), выравнивающее устройство, воздуховод диаметром 100 мм, из которого нагретая струя горизонтально подавалась в помещение (рис.1). В процессе измерений определялись следующие величины: температура T_0 и скорость V_0 воздуха в воздуховоде перед истечением, температура окружающего воздуха $T_{окр}$, максимальные значения скоростей V_x и температур T_x воздуха в струе, а также определялась вертикальная координата оси струи y , отсчитываемая от центра выпускного отверстия. Параметры струи измерялись с помощью термоанемометрической системы, включающей 8 сферических датчиков (подробнее про систему см. [23]).



Рис. 1. Демонстрация развития приточной нагретой струи (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Demonstration of the flow of the supply heated jet (illustration by the authors)

Измерения струи проводилось в соответствии с методикой, указанной в ГОСТ Р ЕН 12238-2012. «Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Аэродинамические испытания и оценка применения для перемешивающей вентиляции». При этом проводились замеры полей скорости и температуры в вертикальных сечениях на различных расстояниях x от истечения. В каждом сечении определялась вертикальная координата y точки с максимальными значениями скорости V_x и температуры T_x . Таким образом, определялась траектория струи $y(x)$.

Исходные параметры струи для экспериментальных исследований выбирались таким образом, чтобы охватить наиболее широкий диапазон значений геометрической характеристики H , охватывающий большинство случаев, встречающихся в практике проектирования. Согласно формуле (10), преобразованной к виду

$$y = \frac{x^3}{3H^2} \times \begin{cases} \frac{1}{3} - \text{Шепелев И. А.} \\ 0,6 - \text{Гримитлин М. И.} \end{cases} \quad (15)$$

следует, что зависимость траектории неизотермической струи от V_0 , ΔT_0 , $T_{окр}$, F_0 , m и n определяется одним параметром – геометрической характеристикой H . Таким образом, значения V_0 и ΔT_0 для экспериментальных исследований подбирались так, чтобы получить различные H (таблица 1). Кроме того, две серии замеров были проведены при практически одинаковых H , но различающихся V_0 и ΔT_0 , для того чтобы проверить указанное выше утверждение.

Таблица 1

Исходные данные экспериментального исследования

| № эксперимента | H , м | V_0 , м/с | $T_{окр}$, К | ΔT_0 , К |
|----------------|---------|-------------|---------------|------------------|
| 1 | 1,35 | 1,7 | 292 | 30,5 |
| 2 | 2,76 | 3,6 | 290 | 34,3 |
| 3 | 3,46 | 3,4 | 288 | 19,5 |
| 4 | 7,37 | 7,0 | 290 | 18,2 |
| 5 | 7,34 | 5,4 | 292 | 10,8 |
| 6 | 13,7 | 9,8 | 290 | 10,1 |

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 представлены траектории горизонтально подаваемой нагретой приточной струи, полученные по результатам эксперимента и рассчитанные по формуле (15). На рис. 4. представлены максимальные скорости струи, измеренные в эксперименте и рассчитанные по формулам (13 и 14).

На рис. 5 представлены избыточные температуры струи $\Delta T_x = T_x - T_{окр}$, полученные из эксперимента и рассчитанные по формуле, являющейся определением температурного коэффициента n :

$$\Delta T_x = \frac{n \Delta T_0 \sqrt{F_0}}{x} \quad (16)$$

При этом для компактной слабноизотермической струи из формулы, предлагаемой в [13] Шепелевым И.А., следует, что температурный коэффициент принимает значение $n = 6,2$. Из формул, предложенных Гримитлиным М.И. в [14] для этого же случая, получается $n = 5,6$.

Анализ результатов эксперимента при одинаковых значениях H , но различающихся V_0 и T_0 (табл. 1, рис. 2) подтверждает вывод о том, что зависимость траектории неизотермической струи от ΔV_0 , ΔT_0 , определяется одним параметром – геометрической характеристикой H . Следует отметить, что независимость траектории от F_0 , m и n (при одинаковой H) не была исследована в силу фиксированного значения диаметра воздуховода в экспериментальной установке. Таким образом, для однозначного подтверждения зависимости траектории только от H необходимо провести дополнительные исследования.

Траектория неизотермической приточной струи, полученная по результатам эксперимента (рис. 3), совпадает с рассчитанной по формуле (8) при $2,7 \text{ м} < H < 14 \text{ м}$.

Однако при $H = 1,35$ м экспериментальная траектория проходит между траекториями, рассчитанными по формулам (8) и (9), и отстоит от них на 40%.

Максимальные скорости неизотермической приточной струи, полученные по результатам эксперимента (рис. 4), отличаются от рассчитанных по формуле (13) и совпадают с результатом формулы для изотермической струи (14).

Максимальные избыточные температуры приточной струи, полученные по результатам эксперимента (рис. 5), отличаются от рассчитанных по формуле (16). При $H < 3$ м эти отличия достигают 5 К, при $H > 7$ м отличия около 0,5 К.

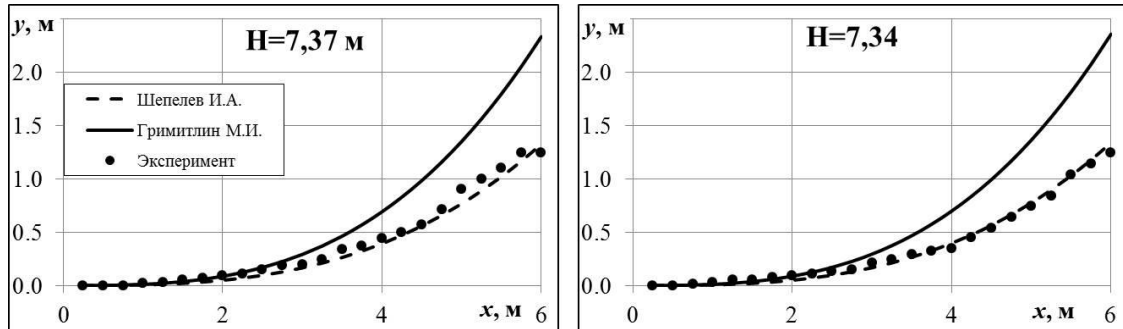


Рис. 2. Траектории приточной струи при одинаковых значениях H (иллюстрация авторов)

Fig. 2. The trajectories of the supply jet at the same values of H (illustration by the authors)

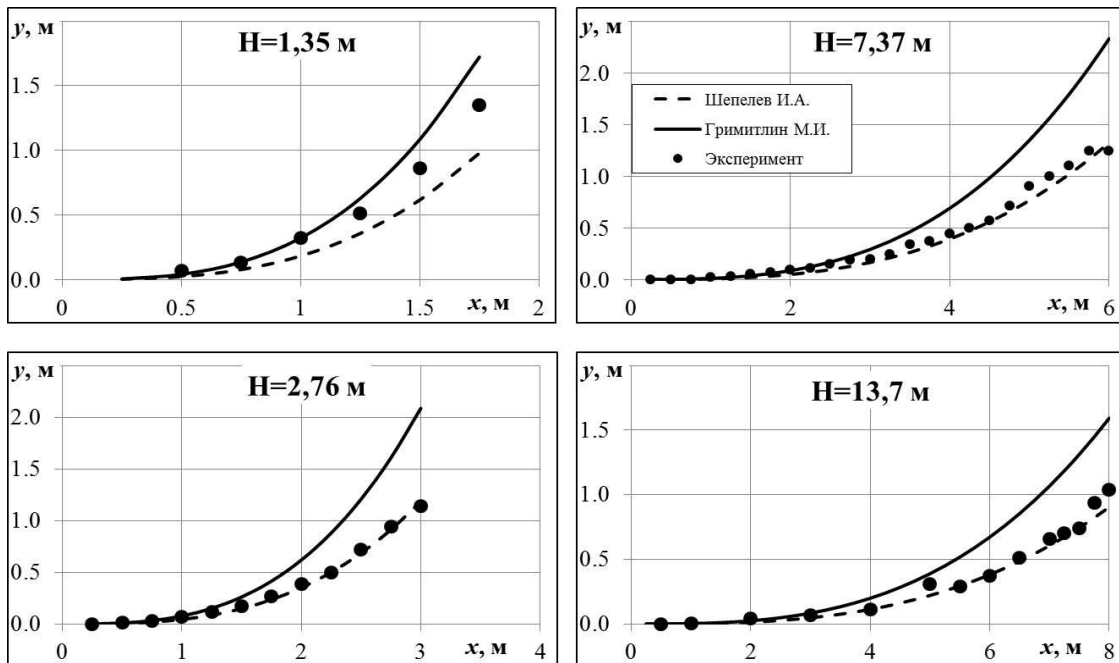


Рис. 3. Траектории приточной струи при различных значениях H (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Supply jet trajectories at different H values (illustration by the authors)

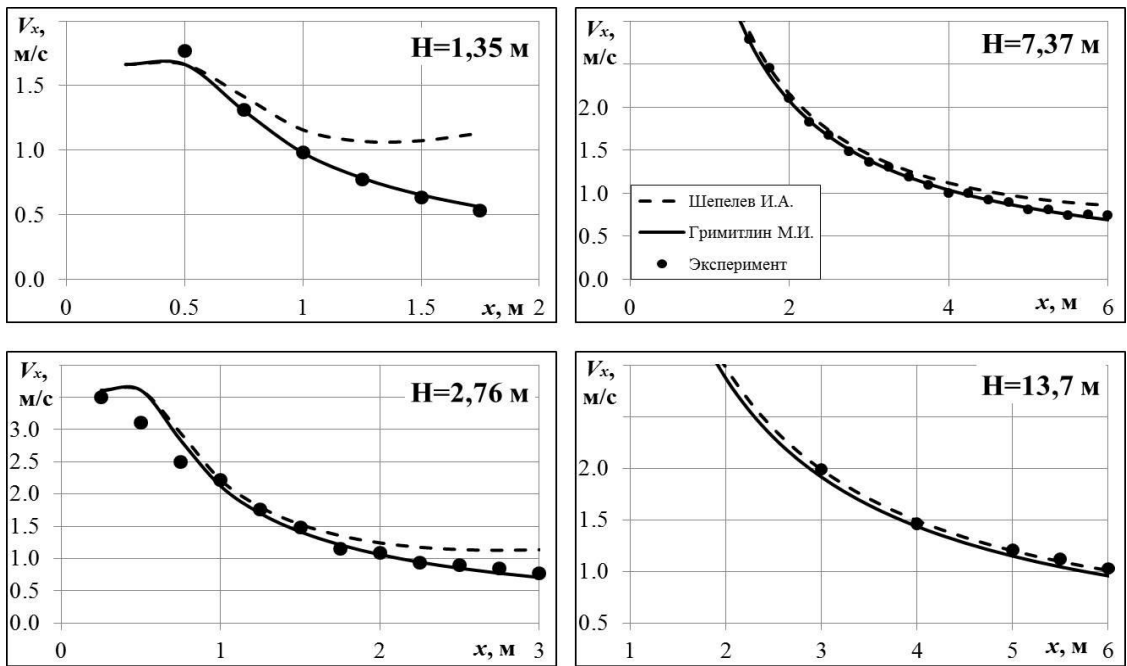


Рис. 4. Максимальные скорости приточной струи на расстоянии x от истечения (иллюстрация авторов)
 Fig. 4. The maximum speeds of the supply jet at a distance x from the outlet (illustration by the authors)

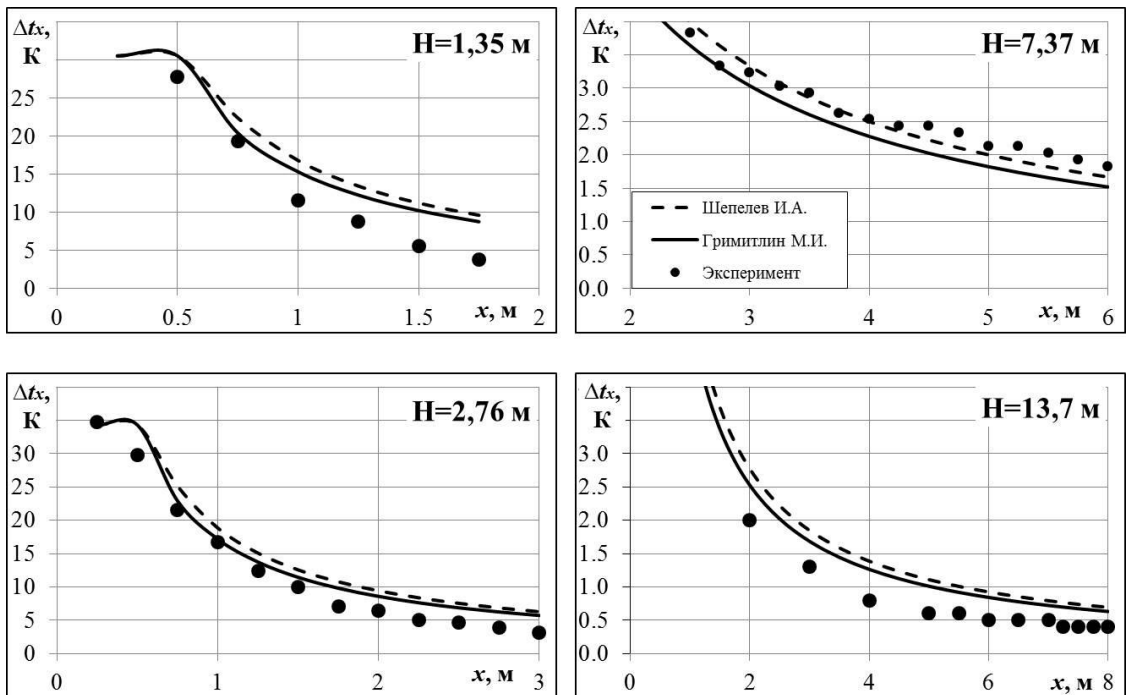


Рис. 5. Избыточные температуры приточной струи на расстоянии x от истечения (иллюстрация авторов)
 Fig. 5. Excessive temperatures of the supply jet at a distance x from the outlet (illustration by the authors)

4. Заключение

1. В результате проведенного анализа методик различных авторов выявлено существенное расхождение в получаемых результатах, в частности, высота подъема нагретой приточной струи, подаваемой горизонтально, различается в 1,8 раз.

2. Проведены экспериментальные исследования течения неизотермической приточной струи, подаваемой горизонтально, при различных параметрах на истечении. Несмотря на то, что отдельные расчеты по различным методикам частично подтвердились экспериментальными данными, полное описание развития

неизотермической струи не дает ни одна из общеизвестных методик. Таким образом, необходимо совершенствование методики расчета неизотермических струй.

3. В результате анализа экспериментальных данных и сравнения их с результатами расчета по инженерным методикам:

- подтверждено, что зависимость траектории неизотермической струи от ΔV_0 , ΔT_0 , определяется одним параметром – геометрической характеристикой H . Для подтверждения независимости траектории от параметров F_0 , m и n при одинаковых H необходимо провести дополнительные исследования, причем не только для отверстий других диаметров, но и для различных типов воздухораспределителей;

- установлено, что траектория струи при $H > 2,7$ м хорошо описывается формулой (15). При $H = 1,35$ м отклонения экспериментальных значений вертикальной координаты струи от рассчитанных по указанной формуле достигает 40%, что недопустимо. Следовательно, для сильнонеизотермических струй требуется проведение дальнейших исследований и корректировка формулы;

- установлено, что скорости неизотермической струи, измеренные в эксперименте, совпадают с рассчитанными по формуле (14) для изотермической струи;

- определено, что избыточные температуры, полученные по результатам эксперимента для слабонеизотермических струй при $H > 7$ м, отличаются от рассчитанных по формуле (16) на 0,5 К. Для сильнонеизотермических струй при $H < 3$ м эти отличия составляют 5 К. Таким образом для таких сильнонеизотермических струй требуется корректировка формулы, для чего необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

4. Для совершенствования методики расчета воздухораспределения неизотермическими струями, подаваемыми горизонтально и под наклоном, необходимо продолжить экспериментальные исследования для различных форм и размеров приточных устройств и углов наклона подачи приточной струи.

Список литературы

1. Денсихина Д.М., Русаков С.В. Изменение параметров микроклимата в течение хоккейного матча в зале крытой ледовой арены // АВОК. 2019. №6. С.26-31. [D.M. Denisihina, S.V. Rusakov. Changes in the microclimate parameters during a Hockey Game in a covered Ice Arena // AVOK. 2019. №6. P.26-31].
2. Walker I., Less B., Lozinsky C., Lorenzetti D., Casquero-Modrego N., Sohn M. Compartmentalization and Ventilation System Impacts on Air and Contaminant Transport for Multifamily Buildings // International Journal of Ventilation. April. 2024. DOI: 10.1080/14733315.2024.2333669
3. Беляев К.В., Гарбарук А.В. Никулин Д.А., Стрелец М.Х. Опыт оптимизации воздухораспределения и параметров микроклимата в православном храме // АВОК. 2021. №7. С.60-65. [K. V. Belyaev, A. V. Garbaruk, D. A. Nikulin, M. Kh.Strelets. Experience in optimizing air distribution and microclimate parameters in an Orthodox Church // AVOK. 2021. №7. P.60-65]
4. Колубков А.Н., Авакян Ю.С. Устройство сети воздуховодов и организация воздухораспределения в горячих цехах предприятий общественного питания // АВОК. 2019. №7. С.38-40 [A. N. Kolubkov, Yu. S. Avakyan. Construction of air ducts network and air distribution arrangement in hot shops of public catering companies // AVOK. 2019. №7. P.38-40].
5. Zhang S, Zhang X, Lin Z. Concept and ventilation performance demonstration of graded ventilation // Building and Environment. April. 2024. DOI:10.1016/j.buildenv.2024.111477.
6. Palmowska, B. Lipska, Research on improving thermal and humidity conditions in a ventilated ice rink arena using a validated CFD model // International Journal of Refrigeration. 2018. Vol. 86. P. 373-387
7. Shokofe, R.; Majid, A.; Hasan, M. Investigating impact of gas emission uncertainty on airflow distribution in an auxiliary ventilation system using CFD and Monte-Carlo simulation // Build. Environ. 2021. №204. 108165.

8. Зиганшин А.М., Тихонов К.С., Кареева Ю.Р. Численное определение характеристик течения через приточную решетку, расположенную за отводом. // *Материалы XXI Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика РААСН В. Н. Богословского «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды»*. Волгоград: ВГМУ, 2023. С. 119–125. [Ziganshin A.M., Tikhonov K.S., Kareeva Yu.R. Numerical determination of flow characteristics through the supply hole located behind the elbow // *Materials of the XXI International Scientific Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of RAASN Academician V. N. Bogoslovsky "Indoor air and environment quality "*, Volgograd: VGMU, 2023. P. 119-125].
9. Денисихина Д.М. Расчет коэффициента воздухообмена методами математического моделирования параметров микроклимата // *Известия КГАСУ*. 2023. № 4(66). С. 337-345. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_337, EDN: WFGUKM [Denisikhina D.M. Calculation of the air exchange coefficient based on CFD-simulation methods // *News KSUAE*. 2023. № 4(66). P. 337-345].
10. K. Khankari *Computational Hydrodynamics Methods as a Tool for Assessment of Ventilation Energy Efficiency in Surgery Rooms Part 1. Air exchange speed.* // *ASHRAE Journal*, vol. 60, no. 5, May 2018.
11. Grau-Bové J., Mazzei L., Strlic M., et al. Fluid simulations in heritage science // *Heritage Science*. 2019; 7(16). – DOI:10.1186/s40494-019-0259-9.
12. Зиганшин А.М., Агапитова А.А., Тихонов К.С. Постановка и валидация численного моделирования течения через приточную решетку – определение сопротивления // *Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: Материалы XX Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды»*. Волгоград. ВолгГМУ. 2022. С. 80-86 [Ziganshin A.M., Agapitova A.A., Tikhonov K.S. Formulation and validation of numerical simulation of flow through a supply grate – determination of resistance // *Materials of the XX International Scientific Conference "Indoor air and environment quality "*, Volgograd: VGMU, 2022. P. 80-86].
13. Шепелев И. А. *Аэродинамика воздушных потоков в помещении*. Москва. Стройиздат, 1978 г. [Shepelev I. A. *Aerodynamics of indoor air flows*. Moscow. Stroyizdat, 1978]
14. Гримитлин М. И. *Распределение воздуха в помещениях*. Санкт-Петербург. АВОК Северо-Запад, 2004. издание 3-е. [Grimitlin M. I. *Indoor air distribution*. Saint-Petersburg. AVOK North-West, 2004. edition 3].
15. Посохин В. Н. *Аэродинамика вентиляции*. Москва. АВОК-ПРЕСС, 2008 [Posokhin V. N. *Aerodynamics of ventilation*. Moscow. AVOC PRESS, 2008].
16. *Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Книга 1 и 2. Справочник проектировщика*. Под редакцией к. т. н. Н. Н. Павлова и инж. Ю. И. Шиллера. Москва. Стройиздат. 1992 г. [Internal sanitary installations. Part 3. Ventilation and air conditioning. Book 1 and 2. Designer's Handbook. Moscow. 1992].
17. Кочарьянц К.В. Исследование зависимости скорости потока в обратном течении от типа приточного устройства // *Электронный научный журнал «Фундаментальные исследования»*. 2017. №4. Ч.1. С. 39-43. Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41432> [Kocharyantc K.V. Investigation of the dependence of the flow velocity in the reverse flow on the type of supply device // *Electronic scientific journal "Fundamental Research"*. 2017. No.4. Part 1. P. 39-43].
18. H. Yamasawa, T. Kobayashi, T. Yamanaka, N. Choi, M. Koshida, M. Cehlin, A. Ameen *Experimental Investigation on the velocity profile of supply flow in impinging jet ventilation system* // *IAQVEC 2023, the 11th international conference on indoor air quality, ventilation & energy conservation in buildings*At: Tokyo, Japan Volume: 396. DOI:10.1051/e3sconf/202339602014.
19. Y. Li, W. Ji, F. Jiang, T. Yu, J. Zhou *Investigation of the influence of jet supply configurations on the thermal and flow behaviors of the wall-attached night ventilation*

- system // May 2022. Sustainable Cities and Society 83(10):103957. DOI:10.1016/j.scs.2022.103957.
20. W. Liu, M. Sandberg. The effects of room length on jet momentum flux // ROOMVENT. August 2022. E3S Web of Conferences 356(7):01001. DOI:10.1051/e3sconf/202235601001
21. Прот. Рябышев. О, Проньков М. А., Дорохов В. Б. Система воздушного отопления, совмещенная с вентиляцией в храме Казанской иконы Божьей Матери в селе Борисоглеб Владимирской епархии // АВОК. 2017. №2. С.34-40 [Protoiereus Oleg Ryabyshev, M. A. Pronkov, V. B. Dorohov. Combined air heating and ventilation system in the Cathedral of the Kazan Icon of the Mother of God in Borisogleb Village of Vladimir Eparchy // AVOK. 2017. №2. P.34-40].
22. Аржанников Р.Г., Беляев К.В., Гарбарук А.В., Никулин Д.А., Полунин Г.С., Стрелец М.Х. Опыт модернизации системы воздушного отопления для сохранения объекта культурного наследия: храм Спаса на Крови в Санкт-Петербурге // АВОК. 2024. №2. С.42-46. [R. G. Arzhanikov, K. V. Belyaev, A. V. Garbaruk, D. A. Nikulin, Experience in Modernization of an air heating system for preservation of a cultural heritage site: Church of the Savior on Blood in Saint Petersburg // AVOK. 2024. №2. P.42-46]
23. Захарова Е. В., Кочарьянц К. В. Исследование быстрозатухающего высокотурбулентного потока, формируемого воздухораспределителем для ступенчатого пола // Научный журнал. 2018. № 3. С. 6-11 [Zakharova E. V., Kocharyantc K.V. Investigation of a fast-extinguishing highly turbulent flow formed by an air distributor for a stepped floor // Scientific Journal. 2018. No. 3. P. 6-11].

Информация об авторах

Кочарьянц Кристина Владимировна, кандидат технических наук, директор по научной работе ООО «Арктос» г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: nin-kasi@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-2801-5699

Тисленко Иван Николаевич, руководитель группы компьютерного моделирования ООО «Арктос» г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: tivanik@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6451-6303

Information about the authors

Kristina V. Kochariantc, candidate of technical sciences, director of science, LLC «Arktos», Saint-Petersburg, Russian Federation

E-mail: nin-kasi@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-2801-5699

Ivan N. Tislenko, head of the computer modeling group, LLC «Arktos», Saint-Petersburg, Russian Federation

E-mail: tivanik@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6451-6303