

УДК 697.922

Посохин В.Н. – доктор технических наук, профессорE-mail: posohin@kgasu.ru**Кареева Ю.Р.** – аспирантE-mail: kareeva_87@mail.ru**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Численное исследование плоской струи,
истекающей из щели конечного размера в тупик****Аннотация**

Численным методом определяются основные характеристики плоской изотермической турбулентной струи, истекающей из щели конечного размера в тупик. В результате решения получены безразмерные зависимости основных геометрических и кинематических характеристик струи от параметра стеснения. Определены: линии тока течения, ширина струи, максимальные и средние скорости в прямом и обратном потоках, расход, статическое давление на оси.

Ключевые слова: численный метод, Fluent, плоская струя, тупик, параметр стеснения.

В известных теоретических работах описаны исследования плоской и осесимметричной струй – источников импульса [1-2], то есть струй, истекающих из отверстий исчезающе малых размеров. Важным фактором, оказывающим влияние на характер развития струи, является параметр стеснения – отношение высоты приточной щели к высоте тупика $\bar{b}_0 = b_0 / H$ или радиуса приточного отверстия к радиусу цилиндрического тупика $\bar{r}_0 = r_0 / R$. В [3,4,5] приводятся результаты экспериментального исследования осесимметричной струи, истекающей из отверстия конечного размера. Работы, описывающие подобные исследования плоской струи, нам не известны.

В этой статье решается задача об истечении плоской струи из щели конечного размера в тупик длиной $l = 2,52$ м и высотой $2H = 0,34$ м. Приточная щель имела размеры $2b_0 = 4,2; 6,0; 11,9; 32,5; 62; 123$ мм, скорость истечения во всех случаях одинакова – $u_0 = 52,9$ м/с. Решение проводится численно с помощью программного комплекса Fluent. В качестве модели замыкания системы уравнений турбулентного движения принята «стандартная» $k - \epsilon$ модель. Для моделирования пограничного слоя вблизи твердой стенки приняты пристеночные функции Enhanced Wall Treatment (расширенное пристеночное моделирование). Граничные условия:

- входное сечение канала – вход с равномерным профилем скорости:
 $u_0 = const, u_n = u_n$ – скорость направлена по нормали к границе;

- открытый торец – свободная проницаемая граница: $\Delta p = 0$ – избыточное давление на границе; $u = u_n$ – скорость направлена по нормали к границе; $\frac{\partial k}{\partial n} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0$.

- твердые стенки: условие прилипания – $v = 0; \frac{\partial v_n}{\partial n} = 0$ – условие непроницаемости;

- нижняя граница – ось симметрии: $u_n = 0$ – скорость по нормали к линии симметрии равна нулю; $\frac{\partial k}{\partial n} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0$.

Здесь $\frac{\partial}{\partial n}$ – производные по нормали к границе.

Расчетная область покрыта сеткой, минимальный размер ячеек в области пограничного слоя – $3,68 \times 10^{-9}$ м, максимальный размер – $4,22 \times 10^{-6}$ м.

На рисунке 1 представлены картины течения при разных значениях параметра стеснения: а) $\bar{b}_0 = \frac{0,01625}{0,17} = 0,0955$; б) $\bar{b}_0 = \frac{0,0615}{0,17} = 0,362$.

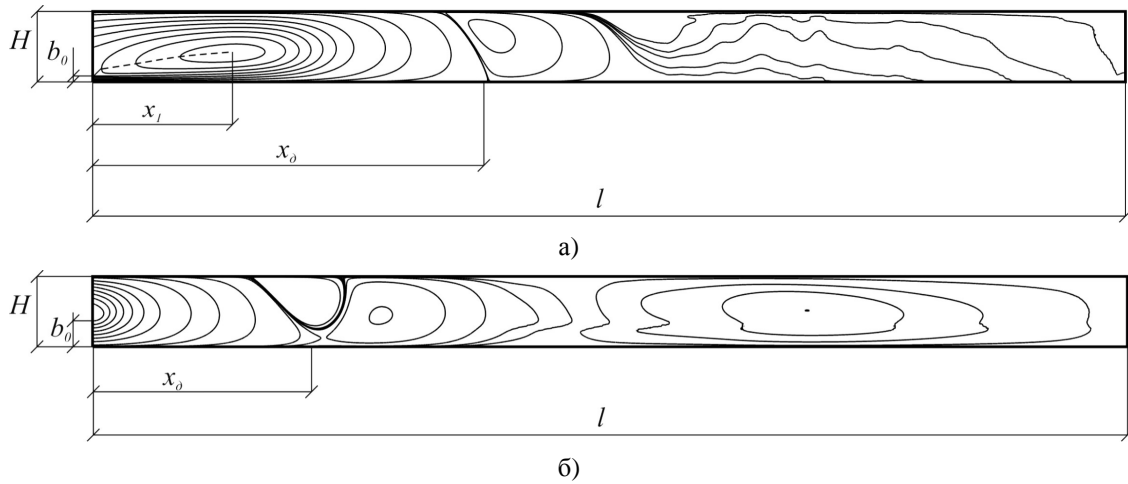


Рис. 1.

В первом случае можно выделить две характерные координаты: x_1 – координата, где струя имеет максимальную ширину, там же начинается зона разворота струи, x_0 – дальнобойность струи. Во втором случае видно, что разворот струи начинается непосредственно в начале тупика, дальнобойность струи здесь заметно меньше. За пределом дальнего действия струи формируются слабо вращающиеся вихри – практически застойная зона.

Результаты численного анализа представлены на графиках в безразмерном виде. В качестве масштабов приняты: линейный масштаб – H , масштаб скорости – u_0 , масштаб расхода – L_0 , масштаб статического давления – $\rho u_0^2 / 2$.

На рисунке 2 представлены графики изменения безразмерной скорости на оси струи. Во всех случаях скорость на начальном участке $\bar{u}_x = u_x / u_0 \approx 1$, далее она начинает падать до нуля, тем быстрее, чем больше параметр стеснения, определяя тем самым дальнобойность струи. В случае, когда параметр стеснения $\bar{b}_0 = 0,362$, дальнобойность струи $\bar{x}_0 = 2,2$, в остальных случаях $\bar{x}_0 \approx 4,5 - 4,9$.

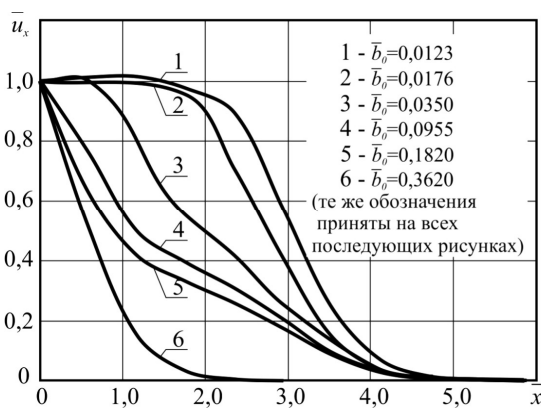


Рис. 2.

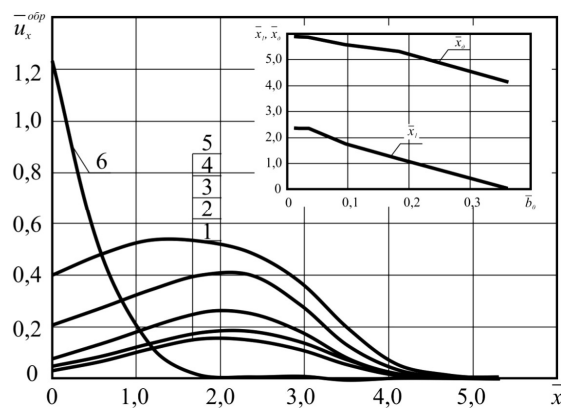


Рис. 3.

На рисунке 3 представлен график изменения максимальной скорости в обратном потоке. Во всех случаях обратная скорость сначала увеличивается до максимального значения при $\bar{x} = \bar{x}_1$, далее она падает до нуля в сечении $\bar{x} = \bar{x}_\delta$. При $\bar{b}_0 = 0,362$ обратная скорость имеет максимальное значение при $\bar{x} = 0$, после чего она сразу же начинает падать. На этом же рисунке показано, как изменяются безразмерные координаты \bar{x}_1 и \bar{x}_δ в зависимости от параметра стеснения. Предлагаются следующие формулы аппроксимации $\bar{x}_1 = 2,48 - 6,924\bar{b}_0$; $\bar{x}_\delta = 6,03 - 5,021\bar{b}_0$.

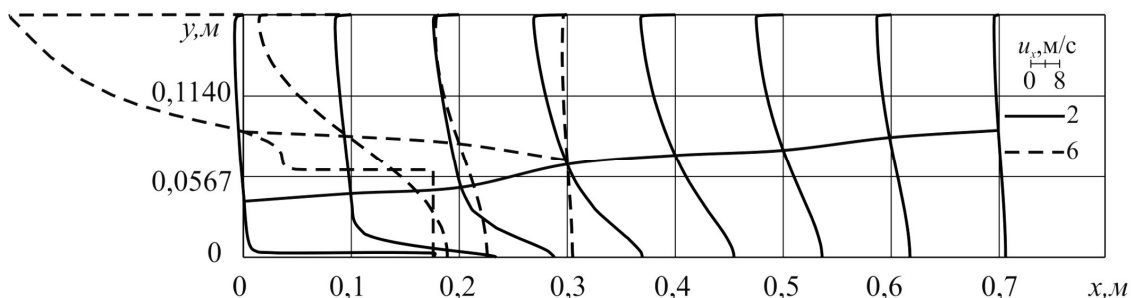


Рис. 4.

На рисунке 4 показаны профили продольной скорости в сечениях тупика для двух значений параметра стеснения. Там же по координатам нулевых значений продольной скорости нанесены границы, разделяющие прямой и обратный потоки. Можно констатировать, что характер течения в этих двух случаях заметно различается.

На рисунке 5 представлено изменение относительного расхода воздуха в активной части струи. В сечении $\bar{x} = 0$ $\bar{L}_x = L_x / L_0 > 1$, что объясняется эжекцией воздуха через открытый торец. Далее расход увеличивается до своего максимального значения при $\bar{x} \approx 2$, где начинается разворот струи. Чем больше параметр стеснения, тем менее интенсивно увеличивается расход. Затем он падает до нуля при $\bar{x} = \bar{x}_\delta$. В случае когда $\bar{b}_0 = 0,362$, максимальное значение расхода имеет при $\bar{x} = 0$. На этом же рисунке показано, как изменяется относительный эжекционный расход $\bar{L}_\delta = L_\delta / L_0$ в зависимости от параметра стеснения. Минимальное значение \bar{L}_δ достигается при $\bar{b}_0 \approx 0,15$.

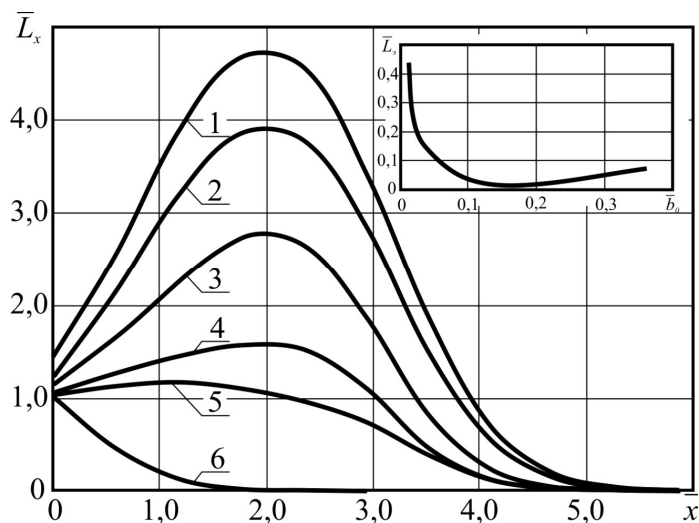


Рис. 5.

На рисунке 6 представлен график изменения ширины струи по длине тупика. При $\bar{x} = 0$ границы всех струй начинаются не от края приточной щели, как казалось бы должно быть, а от ординаты $\bar{y}_0 > \bar{b}_0$. При максимальном значении \bar{b}_0 ширина струи сразу уменьшается, это подтверждает, что практически с $\bar{x} = 0$ начинается разворот струи. На этом же рисунке показано изменение $\bar{y}_{ep}^{эжс} = y_{ep}^{эжс} / H$ в зависимости от параметра стеснения. В пределах $0 < \bar{b}_0 < 0,15$ значение $\bar{y}_{ep}^{эжс}$ уменьшается от максимального значения при $\bar{b}_0 \approx 0$ до минимального при $\bar{b}_0 \approx 0,15$, после чего $\bar{y}_{ep}^{эжс}$ плавно увеличивается.

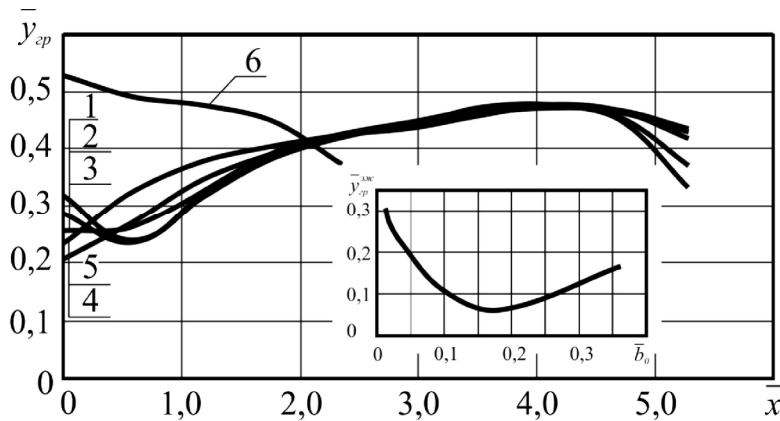


Рис. 6.

Для расчета воздухораспределения в помещениях важно иметь информацию о средних скоростях по сечению струи.

На рисунках 7, 8 представлены результаты вычислений средней по площади скорости в прямом $u_{cp}^{np} = \frac{L_x}{y_{ep}}$, $\bar{u}_{cp}^{np} = \frac{\bar{L}_x}{\bar{y}_{ep}} \bar{b}_0$ и обратном $u_{cp}^{обр} = \frac{L_x}{(H - y_{ep})}$, $\bar{u}_{cp}^{обр} = \frac{\bar{L}_x}{(1 - \bar{y}_{ep})} \bar{b}_0$ потоках.

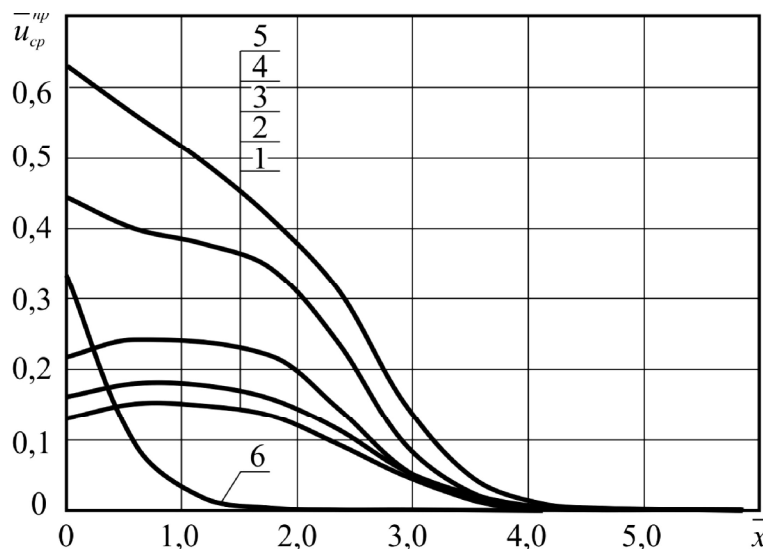


Рис. 7.

Средняя относительная скорость в прямом потоке падает от некоторой величины, определяемой условиями истечения и параметрами эжекции в сечении $\bar{x} = 0$ до нуля при $\bar{x} = x_j$. Причем падение происходит тем интенсивнее, чем больше параметр стеснения.

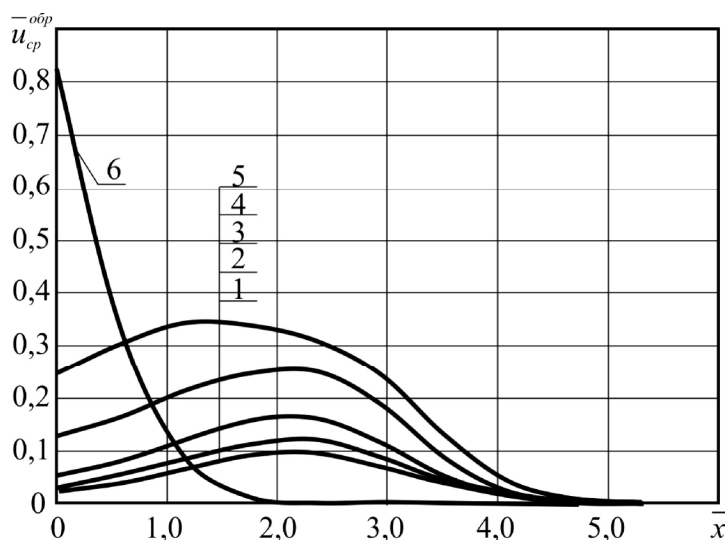


Рис. 8.

В сечении $\bar{x} = 0$ средняя относительная скорость в обратном потоке также определяется интенсивностью эжекции. Затем она возрастает до максимума в сечении \bar{x}_1 и уменьшается до нуля при $\bar{x} = \bar{x}_0$. При $\bar{b}_0 = 0,362$ максимум скорости находится в сечении $\bar{x} = 0$.

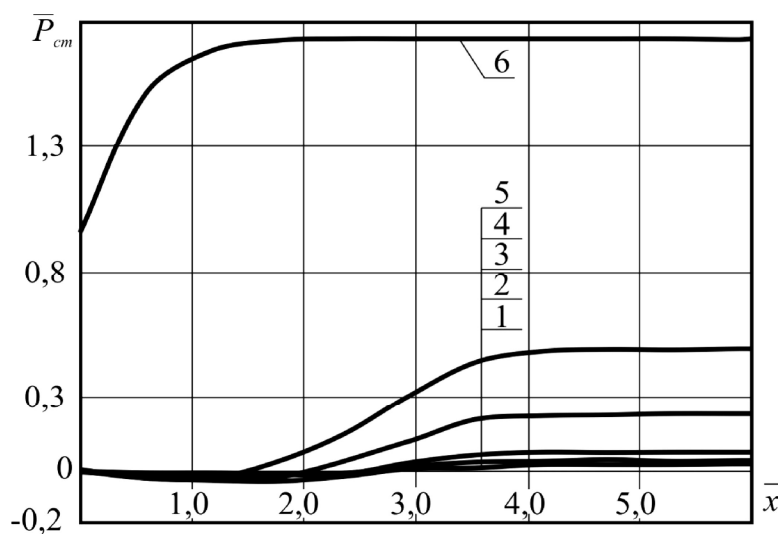


Рис. 9.

На рисунке 9 показано изменение статического давления на оси струи. До сечения $\bar{x} \approx 2$ давление имеет отрицательное значение во всех случаях, кроме $\bar{b}_0 = 0,362$. Далее оно увеличивается до некоторого постоянного значения, тем большего, чем больше b_0 .

Выводы. Результаты численного исследования показывают, что параметр стеснения оказывает значительное влияние на характер развития струи. Увеличение его приводит к быстрому падению осевой скорости и расхода в струе. Дальнобойность струи тем меньше, чем больше параметр стеснения.

В заключение отметим, что аналогичные расчеты были проделаны и для осесимметричных струй, истекающих в цилиндрический тупик из отверстий конечного размера. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментами [3, 5]. При этом получено хорошее совпадение расчетов и опыта, что свидетельствует об адекватности физико-математической модели численного расчета.

Список литературы

1. Тарнопольский М.Д. Общее движение воздуха в вентилируемом помещении при струйной подаче (плоская задача). / В сб. трудов НИИ Сантехники «Кондиционирование воздуха. Сб.18». – М.: Стройиздат, 1966. – С. 179-185.
2. Шепелев И.А. Распространение турбулентной струи в ограниченном пространстве (осесимметричное течение). Тез. науч. семинара «Теплогазоснабжение и вентиляция». – Киев: Будівельник, 1965. – С. 75-81.
3. Бахарев В.А., Трояновский В.Н. Основы проектирования и расчета отопления и вентиляции с сосредоточенным выпуском воздуха. – М.: Профиздат, 1958. – 215 с.
4. Бахарев В.А., Трояновский В.Н. К вопросу о закономерности стеснённых струй. В сб. «Теория и расчет вентиляционных струй». – Л.: ЛИОТ, 1965. – С.173-183.
5. Алемасов В.Е., Глебов Г.А., Козлов А.П., Щелков А.Н. Турбулентные струйные течения в каналах. – Казань. Казанский филиал АН СССР, 1988. – 172 с.

Posohin V.N. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: posohin@kgasu.ru

Kareeva J.R. – post-graduate student

E-mail: kareeva_87@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Numerical research of the flat jet, expiring from the gap with finite size to the dead-end

Resume

In this article the problem about plane of the jet from the gap with finite size to the dead-end with length l and height $2H$ is solved. Inflow gap had sizes $2b_0=4,2; 6,0; 11,9; 32,5; 62; 123$ mm, inflow velocity in all cases the same $u_0=52,9$ м/с. The solution is solved numerically with the help of programm complex Fluent. As a model of closure of the system of flat turbulent motion equations the «standard» $k - e$ model is adopted. Boundary conditions on permeable and impermeable sections of the border region proposed by Fluent are used.

In the result of solution dimensionless dependences of main geometric and kinematic characteristics of jet from the constraint parameter $\bar{b}_0 = b_0 / H$ are obtained. Identified: width of jet, maximum and average velocities in direct and back flows, consumption, static pressure.

All results in the dimensionless form are presented. As a scales are adopted: linear – H ; velocity – u_0 ; consumption – $L_0 = u_0 b_0$; pressure – $\rho u_0^2 / 2$.

The results of numerical research show that the constraint parameter has important influence to the character of jet extension. Its increase leads to fast decrease of axial velocity and consumption in the jet. The range of jet the greater the less constraint parameter.

Keywords: numerical method, Fluent, flat jet, dead-end, constraint parameter.

References

1. Tarnopolsky M.D. Common motion of air in the ventilated room at jetting supply. In proceedings NII Santechnics «Air conditions. Comp.18». – М.: Stroyizdat, 1966. – P. 179-185.
2. Shepelev I.A. Spread of turbulent jet in the limited space (axisymmetric flow). Abstract of scientific seminar «Heat, gas supplying and ventilation». – Kiev.: Budivelnik, 1965. – P. 75-81.
3. Baharev V.A., Troyanovskii V.N. The basics of projection and calculation of heating and ventilation with concentrated issue of air. – М.: Profizdat, 1958. – 215 p.
4. Baharev V.A., Troyanovskii V.N. To the question about regularity of constrained jets. In compilation «The theory and calculation of ventilation jets». – Л.: LIOT, 1965. – P. 173-183.
5. Alemasov V.E., Glebov G.A., Kozlov A.P., Shelkov A.N. Turbulent jetting flows in channeles. – Kazan; Kazan filial AN SSSR, 1988. – 172 p.