На правах руко

Кареева Юлия Рустэмовна

Струйные течения в ограниченных пространствах

Специальность 01.02.05 Механика, жидкости газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Казанский государственный архитектурно-строительный университет" на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор **Посохин Владимир Николаевич**

Официальные оппоненты:

Николаев Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВПО "КНИТУ"), заведующий кафедрой "Оборудования пищевых производств"

Панченко Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» (КНИТУ-КАИ), доцент кафедры «Авиационных двигателей и энергетических установок»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук».

Защита состоится «16» 09 2015 г. в 14[00] часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.02, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» и на сайте http://www.kai.ru/science/disser/index.phtml.

Автореферат разослан « » 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент Каримова А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Струи, развивающиеся в ограниченном пространстве, поперечные и продольные размеры которого соизмеримы с размерами струи, называют стесненными. С такими струями мы имеем дело при решении различных технических задач: расчет воздухораспределения в вентилируемых помещениях, горных выработках метрополитенах, конструировании промышленных печей, теплообменных аппаратов и т.д.

Закономерности развития стесненных и свободных струй существенно отличаются. Существующие методики расчета таких течений обычно основываются на интегральных соотношениях, для решения которых используются нестрогие предпосылки: постоянство статического давления в области течения, подобие профилей продольной скорости и т.п., поэтому результаты анализа существенно расходятся с опытом. Отсюда вытекает безусловная актуальность проблемы и необходимость анализа стесненных струйных течений в более строгой постановке.

Эта работа посвящена исследованию турбулентных двумерных течений. Рассматриваются струи в тупиковых и проточных каналах при разных значениях параметров поперечного и продольного стеснения. То есть варьируется отношение поперечных размеров приточного отверстия и канала, а также дальнодействия струи и протяженности канала. Исследуется также влияние взаиморасположения отверстий для подачи и удаления воздуха.

Работа выполнялась в соответствии с тематическим планом научно-исследовательских работ Казанского государственного архитектурно-строительного университета в 2009 - 2014 г.г.

Цель работы: разработать методику расчета струйных течений в ограниченных пространствах для широкого диапазона значений параметров поперечного и продольного стеснения и различных схем подачи и удаления воздуха.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **основные задачи:**

выбор схемы численного решения поставленных задач с использованием программного комплекса *Fluent*;

исследование влияния параметров продольного и поперечного стеснения, а также схем подачи и удаления воздуха на закономерности изотермических и неизотермических плоских и осесимметричных струй в тупиковых и проточных каналах;

- теоретический анализ течения в зоне разворота плоской струи в тупиковом канале конечной длины.

Основная идея работы состоит в том, чтобы на основе численного решения уравнений турбулентного движения определить влияние параметров продольного и поперечного стеснения, а также взаиморасположения отверстий для подачи и удаления воздуха в тупиковые и проточные каналы на характеристики двумерных струйных течений, при этом рассматриваются струи-источники импульса и струи, истекающие из отверстий конечного размера.

Методы исследования включали: численный метод решения системы дифференциальных уравнений турбулентного движения, аналитическое исследование с использованием метода конформных отображений.

Достоверность полученных результатов и представленных выводов подтверждается использованием известных математических методов и фундаментальных положений гидродинамики, хорошей сходимостью результатов численного эксперимента по программе *Fluent* и опытных исследований, полученными другими исследователями.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- зависимости характеристик плоских и осесимметричных стесненных струй от геометрии области определены путем численного решения систем уравнения турбулентного движения без введения каких-либо предпосылок и положений, упрощающих физику явления;

- впервые обнаружено существенное влияние эжекции воздуха через открытый торец тупикового канала на развитие струи на участке от места истечения до зоны разворота;

- методом конформных отображений определены характеристики плоской струи в зоне разворота в тупике конечной длины.

Теоретическое значение работы:

- впервые на основе численного решения строгих уравнений турбулентного движения определены зависимости основных геометрических, кинематических, динамических и тепловых характеристик стесненных плоских и осесимметричных струй, развивающихся в тупиковых и проточных каналах от параметров поперечного b_0/H (r_0/R) и продольного l/H (l/R) стеснения, а также от расположения мест подачи и удаления воздуха. Указанные зависимости определены для струй-источников импульса и для струй, вытекающих из отверстий конечного размера в широком диапазоне значений параметров стеснения;

- установлено существенное влияние эжекции воздуха через проницаемый торец тупикового канала на характеристики струй;

- аналитическим методом решена задача о течении воздуха в зоне разворота для тупика конечной длины.

Практическое значение работы:

- для установления возможности адекватного численного решения задач о течении струй в ограниченном пространстве при помощи пакета *Fluent*, определена соответствующая схема и алгоритм решения;

- получены зависимости для характеристик стесненных струй от параметров продольного и поперечного стеснения, а также от взаиморасположения мест подачи и удаления воздуха, которые использованы в дальнейшем для коррекции существующей методики расчета воздухораспределения в вентилируемых помещениях.

Реализация результатов работы:

- рекомендации по проектированию воздухораспределения в помещениях внедрены проектным институтом "СОЮЗХИМПРОМПРОЕКТ" ФГБОУ ВПО КНИТУ при проектировании систем вентиляции в помещениях лабораторно-

бытового корпуса на ОАО "КЗСК-Силикон" и лабораторного корпуса КГПТО на ОАО "ТАИФ-НК", г. Казань;

- рекомендации по проектированию воздухораспределения в помещениях внедрены ООО "Газпром трансгаз Казань" при проектировании системы вентиляции гаражных боксов для хранения автомобилей на газовом топливе, г. Казань.

- результаты исследований вошли в учебник и в учебное пособие «Основы гидравлики и теплотехники» для бакалавров по направлению 270800.62 – Строительство.

На защиту выносятся:

- зависимости основных характеристик струй-источников импульса и струй, истекающих из отверстий конечного размера от параметров продольного и поперечного стеснения, а также от мест подачи и удаления воздуха, полученные в результате численного расчета стесненных струй в тупиковом и проточном каналах;

- зависимости для характерных геометрических параметров струй от параметров стеснения;

- данные о влиянии эжекции на основные характеристики струй;

- зависимости, полученные в результате аналитического расчета течения в зоне разворота плоской струи в тупике конечной длины;

- зависимости основных характеристик слабонеизотермической струи в тупике от параметра продольного стеснения

Апробация работы. Публикации. Основные положения работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях Казанского государственного архитектурно-строительного университета (2009 – 2014 гг), международной научно – практической конференции «Инженерные системы – 2010» Российский университет дружбы народов (2010 г.), XII международной конференции «Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах» Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (2011 г.). Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 18 работах, в том числе 3 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, включенных в список ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав основного содержания, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем работы 165 страниц, в том числе: 153 страницы – основной текст, содержащий, 120 рисунков на 97 страницах; список литературы из 79 наименований на 9 страницах, приложений на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, основные задачи, научная новизна и практическая значимость работы, представлены данные о соответствии диссертации паспорту специальности, практическом внедрении результатов работы и выносимые на защиту положения, степень апробации и сведения о научных публикациях автора, приведены сведения об объеме и структуре диссертации.

В **первой главе** диссертации отмечается вклад российских и зарубежных ученых в исследование стесненных струй.

Экспериментальным исследованием струйных течений в тупиковом и проточном каналах занимались В.Н. Розенберг, Бахарев В.А., Трояновский В.Н., Н.Д. Черепенин, С.В. Поляков, А.И. Гусак, М.Г. Кталхерман, Я.И. Харитонова, А.К. Козодой, А.А. Босенко, В.В. Гнатюк, Т.А. Гнатюк, Л.П. Ярин, В.Е. Алемасов, Г.А. Глебов, А.П. Козлов, А.Н. Щелков, К.Ю. Лайна, F. Risso, J. Fabre.

Аналитическим исследованием таких задач посвящены работы Г.Н. Абрамовича, М.Д. Тарнопольского, И.А. Шепелева, Б.М. Павлова, Н.И. Потехина, Г.М. Позина, М.И. Гримитлина, В.Е. Алемасова, Г.А. Глебова, А.П. Козлова, А.Н. Щелкова.

Аналитические решения получены с помощью интегральных соотношений, при этом использовались следующие упрощения: статическое давления считалось постоянным; граница струи – прямолинейная; в некоторых случаях рассматривалась струя-источник, то есть предполагалось, что все торцы тупика заглушены, тупик полагался бесконечно длинным.

Отдельно можно выделить исследования, касающиеся зоны разворота струи. Исследованием данного вопроса занимались Г.Н. Абрамович (плоское течение), И.А. Белов, Р.Н. Когтев, В.А. Черных (осесимметричное). Рассматривалось течение идеальной несжимаемой жидкости. Начало разворота принято в сечении, где средние скорости в прямом и обратном потоке равны. Детали течения до и после разворота не учитывались. В процессе решения задачи о развороте плоской струи Г.Н. Абрамовичем сделано упрощение – два параметра отображения приняты равными, то есть, по сути, предполагалось, что речь идет о бесконечно длинном тупике.

Отдельно отметим новую ветвь гидродинамических методов расчетов - вычислительную гидродинамику, ВГД (*Computatuional Fluid Dynamics, CFD*), в основе которых лежит численное решение системы дифференциальных уравнений движения жидкости. Инженерные («коммерческие») вычислительные комплексы *CFD*, такие как программы *Fluent, Phoenics, Flow 3D* и др., достаточно универсальны и позволяют решать широкий круг гидродинамических задач.

Численные эксперименты с использованием различных вычислительных комплексов проводили P.V. Nilsen, A.Restivo, J.H. Whitelaw, Taghi Karimipanah, Amina Mataoui, Roland Schistel и Abdelaziz Salem. Исследуемые задачи решались, в основном, в трехмерной постановке, геометрии приближены к реальным условиям: вентиляции помещений, воздухораспределение в тоннелях, кондиционирование воздуха, камер сгорания и т.д.

На основе аналитического обобщения научных источников определены цели и задачи исследований.

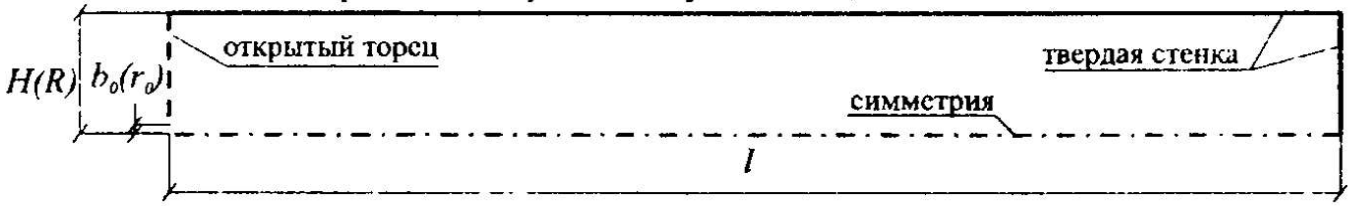
Исследования в данной работе проводились с помощью вычислительного комплекса *Fluent*, который позволяет методом конечных объемов решать систему дифференциальных уравнений движения жидкости. Чтобы замкнуть основную систему, для данного исследования из подходящих моделей турбулентности (k ε «стандартная», $k-\omega$, модель рейнольдсовых напряжений) использована модель k

- ε «стандартная», то есть в систему дополнительно вводятся уравнения переноса k и ε, $k = \overline{u_i' u_i'}/2$ - кинетическая энергия турбулентных пульсаций; $\varepsilon = \nu\left(\partial \vec{u}_i'/\partial x_j\right)^2$ - скорость диссипации k. Так образуется замкнутая система уравнений.

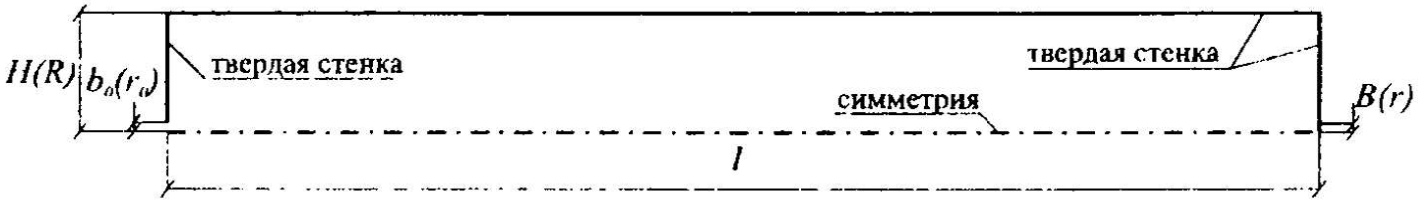
На предварительном этапе необходимо при помощи предпроцессора *Gambit* построить расчетную область и сетку. Затем в *Fluent* задаются граничные условия, выбираются расчетные модели, предположения и параметры, т.е. реализуется определенная схема численного решения. После выбора схемы решения проводится расчет задачи. По достижении заданной точности решение при помощи встроенного в *Fluent* или внешнего постпроцессора (*Tecplot*) представлялось графически и анализировалось. Если решение оказывалось физически несостоятельным, то вносились соответствующие корректировки на предварительной стадии или стадии выбора схемы, и вновь проводился расчет.

Во **второй и в третьей главах** диссертации представлены результаты исследования плоских и осесимметричных стесненных изотермических струй в тупике и проточном канале. Геометрии задач, представлены на рисунке 1: а)-б) - плоская и осесимметричная задачи, в)-г) плоская задача):

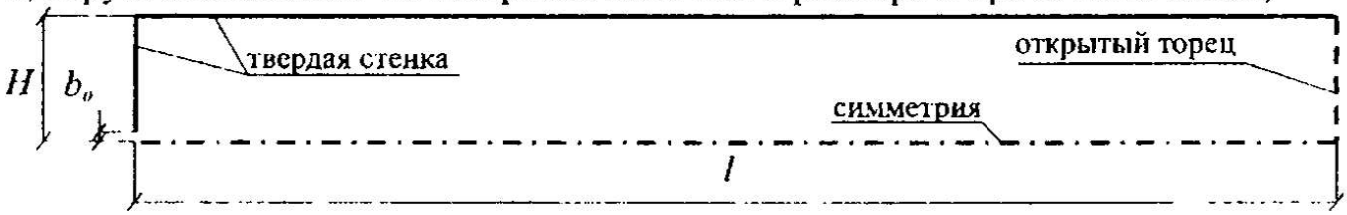
а) струя-источник и струя, истекающая из отверстия конечного размера в тупик, сток находится за пределами тупика на удалении;



б) струя – источник в тупике, отверстия для подачи и удаления воздуха расположены соосно;



в) струя, истекающая из отверстия конечного размера в проточный канал;



г) струя, истекающая из отверстия конечного размера в тупик, отверстия для подачи и удаления воздуха расположены несоосно.

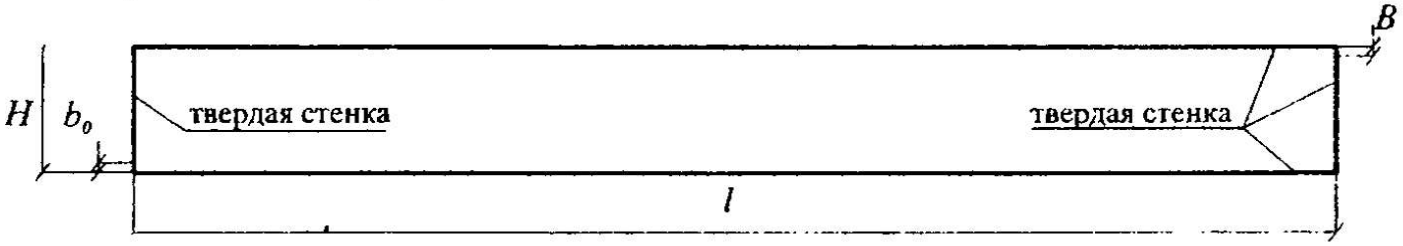


Рис 1. Геометрии исследованных областей

Во всех случаях тупик (канал) имеет высоту $2H = 2R = 0{,}34$ *м*. Скорость истечения струи равномерна по высоте щели и равна $u_0 = 52{,}9$ *м/с*. Рассматривается два типа задач: струя-источник импульса и струя, истекающая из щели конечного размера.

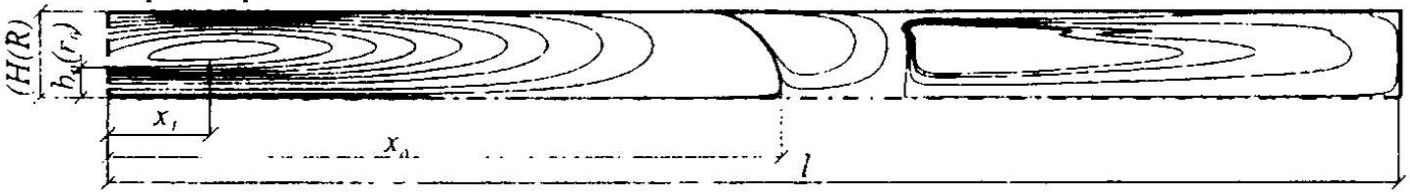


Рис. 2 Линии тока течения

На рисунке 2 представлены линии тока течения в тупиковом канале. На малом удалении от истечения, когда поперечный размер струи еще существенно меньше поперечного размера помещения струя развивается как свободная: границы ее прямолинейны, распределение продольной компоненты скорости по сечениям такое же, как в струе свободной, далее струя продолжает расширяться, но уже не так интенсивно как свободная, границы ее криволинейны. В некотором характерном сечении x_1 ширина струи достигает максимума, после чего следует зона разворота; струя распадается, формируя обратный поток. Конец зоны разворота струи определяет ее дальнобойность x_c, за пределами которой образуется зона слабого вихревого движения. Интенсивность циркуляции последовательно расположенных вихрей быстро убывает. В сущности, можно говорить, что за пределами дальнодействия струи образуется застойная зона.

Исследуется влияние продольного (l/H (l/R)) и поперечного (b_0/H (r_0/R)) стеснения, а также влияние взаиморасположения приточного и вытяжного отверстий на основные характеристики струи.

Рассматривается струя-источник (значение параметра поперечного стеснения близко к нулю (b_0/H $(r_0/R) = 0{,}0088$)) в тупиках разной длины:

- «длинный» тупик – длина тупика заведомо больше дальнобойности струи, $l = 2{,}52$ м $> x_0$ ($l/H(l/R) = 14{,}82$);

- «средний» тупик – длина тупика примерно равна дальнобойности струи, $l = 0{,}82$ м $\approx x_0$ ($l/H = 4{,}82$) для плоской струи; $l = 1{,}1$ м $\approx x_0$ ($l/R = 6{,}47$) для осесимметричной струи;

- «короткий» тупик – длина тупика заведомо меньше дальнобойности струи, $l = 0{,}5$ м $< x_0$ ($l/H(l/R) = 2{,}94$).

Влияние параметра поперечного стеснения изучалось для тупика постоянной длины $l = 2{,}52$ м, приточная щель имела размеры $2b_0 = 2r_0 = 4{,}2$; 6,0; 11,9; 32,5; 62; 123 мм, соответственно параметр b_0/H (r_0/R) принимает значения b_0/H $(r_0/R) = 0{,}0123$; 0,0176; 0,0350; 0,0955; 0,1820; 0,3620. Для осесимметричной струи скорости истечения приняты, как в опытах В.А. Бахарева, В.Н. Трояновского – u_0=53,4; 52,7; 52,8; 52,9; 50,9; 28,3 м/с.

В результате решения получены основные геометрические, кинематические и динамические характеристики струи: линии тока течения, максимальные скоро-

сти в прямом и обратном потоках, профили продольных компонент скорости, расходы, координаты границ струи, статическое давление на оси и стенке тупика, средние скорости в прямом и обратном потоках.

Ниже на графиках представлены результаты в безразмерном виде, где в качестве масштабов приняты:

а) в задачах, где рассматривается струя-источник - характеристики свободной струи, то есть

$$k_u = u^{cm}/u^{ce};\ k_{y(r)} = y^{cm}/y^{ce}\left(r^{cm}/r^{ce}\right);\ k_L = L^{cm}/L^{ce};\ k_p = p/\left(\rho u_0^2/2\right) \qquad (1)$$

б) в задачах, где рассматривается струя, истекающая из щели конечного размера параметры струи на истечении, то есть

$$\bar{u}_x = u^{cm}/u_0;\ \bar{y}_x(r_x) = y_x^{cm}/b_0\left(r^{cm}/r_0\right);\ \bar{L} = L^{ce}/L_0;\ \bar{p} = p/\left(\rho u_0^2/2\right) \qquad (2)$$

Характеристики свободных струй определены по известным формулам И.А. Шепелева.

В качестве линейного масштаба принята полувысота (радиус) тупика $H(R)$.

Верификация численной модели проводится путем сравнения полученных результатов для течения в тупике с известным экспериментальным исследованием В.А.Бахарева, В.Н.Трояновского.

На рис. 3 представлены результаты численного определения основных характеристик плоской струи-источника в тупиковом канале - схемы 1а и 1б.

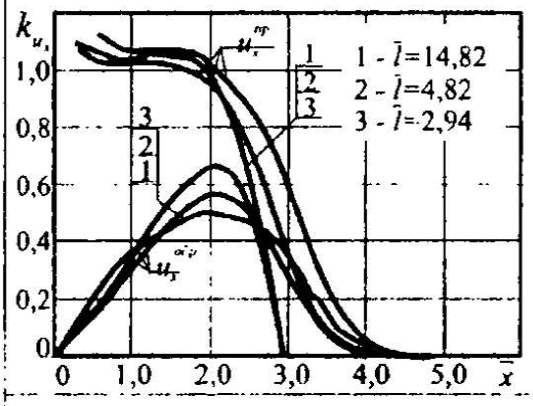
При $\bar{x} < \bar{x}_1$ $k_{u_x} \approx 1$, (рис. 3.1а, 3.2а) то есть осевые скорости стесненных и свободных струй здесь примерно одинаковы. В этом же интервале изменений $\bar{x}$ максимальные безразмерные скорости в обратном потоке возрастают, принимая максимальные значения при $\bar{x}_1$. Можно считать, что в сечении $\bar{x}_1$ начинается зона разворота струи, скорости в прямом и обратном потоках далее интенсивно падают до нуля или до минимального значения (при соосном расположении отверстий для подачи и удаления воздуха), обозначая тем самым дальнобойность струи - $\bar{x}_0$; для "короткого" тупика $\bar{x}_0 = 2{,}97$, то есть $\bar{x}_0 = \bar{l}$; для "среднего" и "длинного" тупиков $\bar{x}_0 = 4{,}82$.

При $\bar{x} < \bar{x}_1$ для всех струй $k_{v_x} > 1$ (рис. 3.1б, 3.2б), то есть струя расширяется более интенсивно, чем свободная. Это объясняется эжектирующим действием струи через открытый торец тупика. Далее, за сечением $\bar{x} > \bar{x}_1$, наличие обратного потока препятствует расширению струи и соответственно k_{v_x} становится меньше 1. Формы границ струй определены вплоть до $\bar{x}_0$.

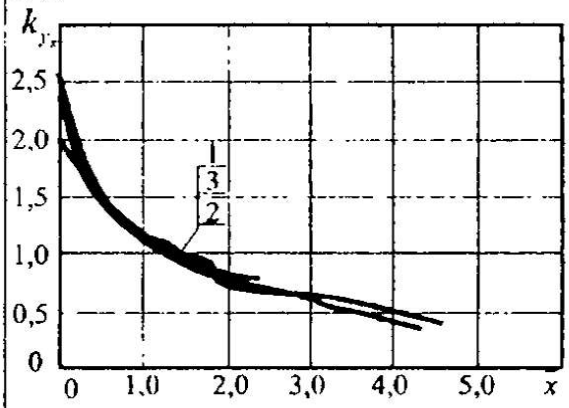
В сечении $\bar{x} = 0$ $k_L > 1$, что также является следствием эжекции. Далее расход увеличиваются до своего максимального значения при $\bar{x}_1$, после чего начинается разворот (распад) струи с формированием обратного потока. В некотором сечении расход принимает нулевое значение, определяя тем самым дальнобойность струи x_0.

3.1 Плоская струя-источник в тупике (схема - рис. 1а)

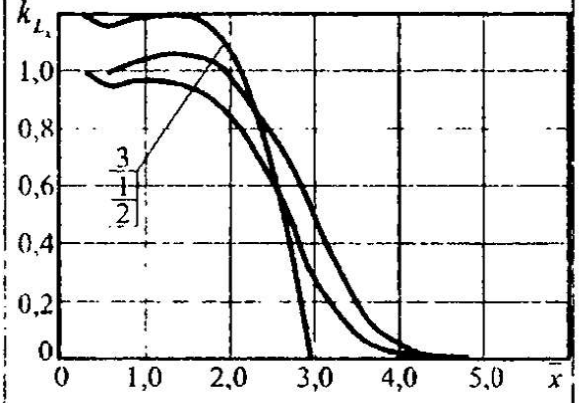
3.1а



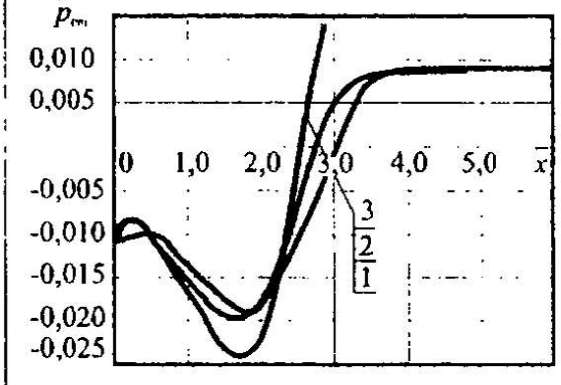
3.1б



3.1в

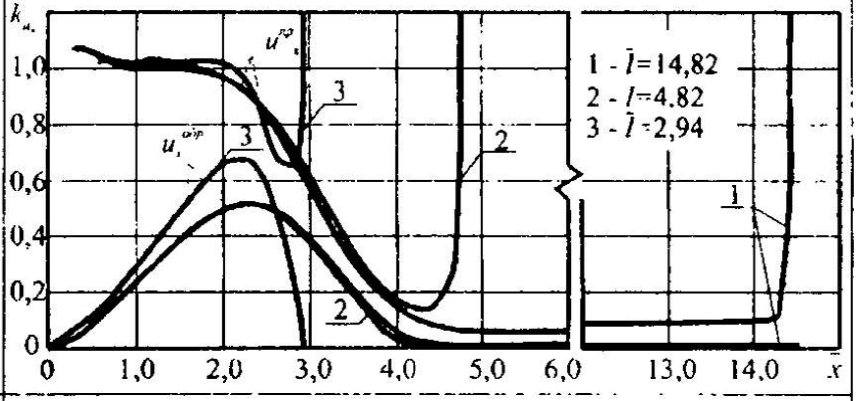


3.1г

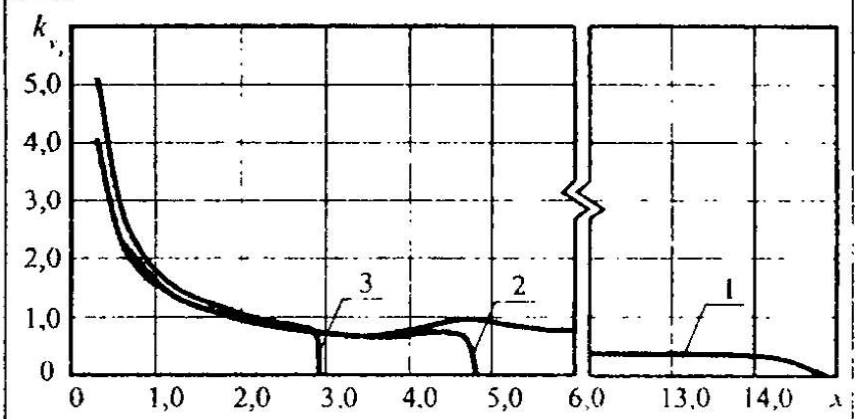


3.2 Плоская струя-источник в тупике при соосном расположении приточного и вытяжного отверстий (схема - рис. 1б)

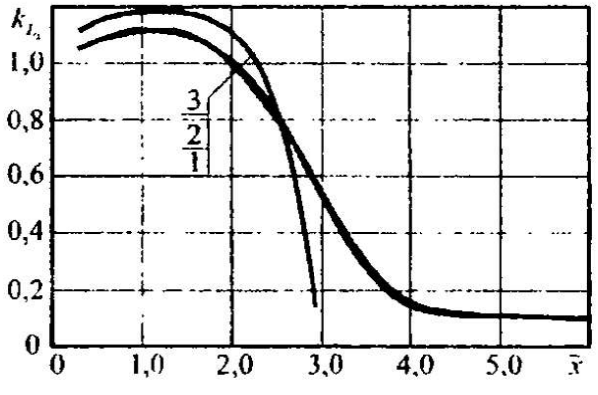
3.2а



3.2б



3.2в



3.2г

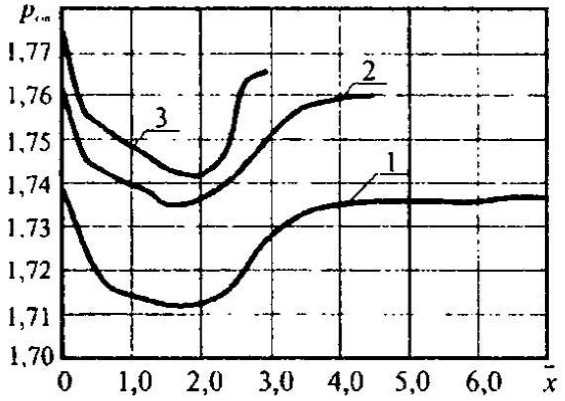


Рис. 3

Как видно эжекция вносит весьма существенный вклад в циркуляцию воздушных масс в тупике. Расход эжектируемого воздуха определяется начальным импульсом струи и практически не зависит от длины тупика.

До сечения $\bar{x} \approx x_1$ статическое давление отрицательно (рис. 3.1г), чем короче тупик, тем больше разрежение на оси. В случае течения струи в тупике при соосном расположении отверстий для подачи и удаления воздуха (рис.3.2г) статическое давление падает до минимального значения при $\bar{x} \approx x_1$. Далее давление возрастает до постоянного значения для «среднего» и «длинного» тупика и до максимального при $x = x_0$ для «короткого».

На рис. 4, 5 представлены графики изменения максимальных скоростей в прямом и обратном потоках, ширины струи, расхода в активной части и статического давления на оси плоской и осесимметричной струи, истекающей из щели конечного размера в тупик (рис.4.1, 4.2), для плоской струи в проточном канале (рис. 5.1) и плоской струи в тупике при несоосном расположении отверстий для подачи и удаления воздуха (рис.5.2).

Во всех случаях скорость на начальном участке $\overline{u_x} \approx 1$ (рис.4.1а, 4.2а, 5.1а, 5.2а), далее она начинает падать до нуля, тем быстрее, чем больше параметр стеснения. Для плоской струи, истекающей из отверстия конечного размера, когда параметр стеснения $\bar{b}_0 = 0{,}362$ дальнобойность струи $\bar{x}_0 = 2{,}2$, в остальных случаях $\bar{x}_0 \approx 4{,}5 - 4{,}9$. На рис. 4.2а также приведены опытные точки из работы В.А.Бахарева. При малых значениях параметра стеснения результаты численного эксперимента хорошо совпадают с опытными данными. Для значений $\bar{r}_0 > 0{,}0955$ расхождение расчета с опытом не превышает 15%. При течении струи в тупике с несоосным расположением отверстий для подачи и удаления воздуха скорость от начального значения падает до минимального в некотором сечении и затем остается постоянной, резко возрастая к вытяжному отверстию.

При $\bar{x} = 0$ границы всех струй (рис. 4.1б, 4.2б, 5.1б, 5.2б) начинаются не от края приточной щели (b_0/H, r_0/R) как казалось бы должно быть, а от ординаты $y_0/H(R) > b_0/H\,(r_0/R)$ (рис. 4.1б, 4.2б), что объясняется фактом эжекции через открытый торец. Ширина струи тем больше, чем меньше параметр стеснения. На рисунке 4.1б показано изменение относительной ширины потока воздуха, поступающего в тупик за счет эжекции $y_{гр}^{эж}/H$ ($y_{гр}^{эж} = y_{гр} - b_0$) в зависимости от параметра стеснения. В пределах $0 < \bar{b}_0 < 0{,}15$ значение $y_{гр}^{эж}/H$ уменьшается от максимального значения при $\bar{b}_0 \approx 0$ до минимального при $\bar{b}_0 \approx 0{,}15$, после чего плавно увеличивается.

При течении струи в проточном канале (рис. 5.1б) и в тупике при несоосном расположении отверстий подачи и удаления воздуха (рис. 5.2б) граница струи изменяется сложным образом. В некотором сечении она достигает максимума, ширина струи становится равной высоте тупика.

В сечении $\bar{x}=0$ $\bar{L}_x>1$ (рис. 4.1в, 4.2в, 5.1в. 5.2в), что объясняется эжекцией воздуха через открытый торец. Далее расход увеличивается до своего максимального значения при $\bar{x}_1$, где начинается разворот струи. Чем больше параметр стеснения, тем менее интенсивно увеличивается расход. Затем он падает до нуля при $\bar{x}=x_0$ (рис. 4.1в и 4.2 в) или до постоянного значения, которое определяется интенсивностью стока (рис. 5.1в и 5.2в). Для плоской струи в тупике в случае когда $\bar{b}_0 = 0{,}362$ максимальное значение расход имеет при $\bar{x}=0$. На рисунке 4.1в показано как изменяется относительный эжекционный расход $\bar{L}_{эж}$ ($L_{эж}=L-L_0$) в зависимости от параметра стеснения. Минимальное значение $\bar{L}_{эж}$ достигается при $\bar{b}_0 \approx 0{,}15$.

Определены формулы, аппроксимирующие зависимость характерных координат $\bar{x}_1$, $\bar{x}_0$ от параметра поперечного стеснения:

- плоская струя в тупике (схема - рис. 1а):

$$\bar{x}_1 = 6.03 - 6{,}924\bar{b}_0;\ \bar{x}_0 = 6{,}03 \quad 5{,}021\bar{b}_0; \qquad (3)$$

- осесимметричная струя в цилиндрическом тупике (схема - рис. 1а):

$$\bar{x}_1 = 176{,}6\bar{r}_0^{4} - 118{,}5\bar{r}_0^{3} + 16{,}9\bar{r}_0^{2} + 2{,}2;\ \bar{x}_0 = 97\bar{r}_0^{3} \quad 76\bar{r}_0^{2} + 19{,}1\bar{r}_0 + 5{,}5; \qquad (4)$$

- плоская струя в проточном канале (схема - рис. 1в):

$$\bar{x}_1 = -2{,}7\bar{b}_0^{2} + \bar{b}_0 + 0{,}32;\ \bar{x}_0 \quad -26{,}7\bar{b}_0^{2} + 11\bar{b}_0 + 4{,}4. \qquad (5)$$

- плоская струи в тупике при несоосном расположении приточного и вытяжного отверстий (схема - рис. 1г):

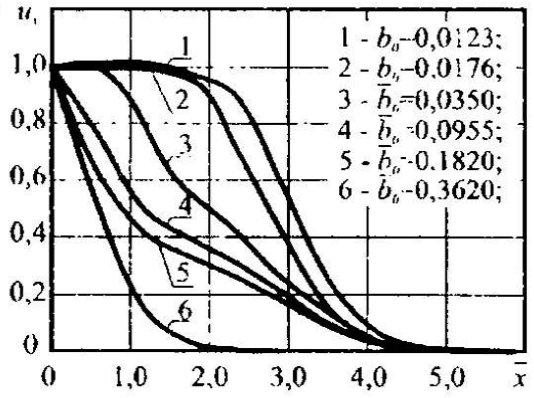
$$\bar{x}_1 = -271\bar{b}_0^{3} + 125{,}45\bar{b}_0^{2} - 11{,}8\bar{b}_0 + 2{,}03;\ \bar{x}_0 = 958{,}45\bar{b}_0^{3} - 569{,}58\bar{b}_0^{2} + 81{,}84\bar{b}_0 + 3{,}56; \qquad (6)$$

На рис. 4.1г, 4.2г, 5.1г, 5.2г показано изменение статического давления на оси струи. Характер изменения во всех случаях одинаков. На выходе из приточного насадка давление падает до минимального значения в сечении $\bar{x}_1$. Далее $\bar{p}_{ст}$ возрастает до постоянного значения. Причем чем меньше параметр стеснения, тем давление больше.

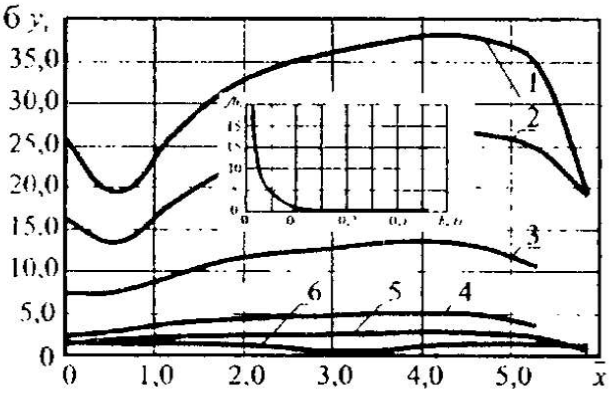
Проведенное исследование показывает, что расположение мест подачи и удаления воздуха слабо влияет на характер течения и дальнобойность струи. Параметры стеснения, напротив, оказывают значительное влияние на характер развития струи. Увеличение параметра поперечного стеснения приводит к быстрому падению осевой скорости и расхода в струе; ширина струи и ее дальнобойность тем меньше, чем больше этот параметр. Влияние фактора продольного стеснения становится решающим, когда длина тупика заведомо меньше дальнобойности струи.

4.1 Плоская струя в тупике
(схема - рис.1а)

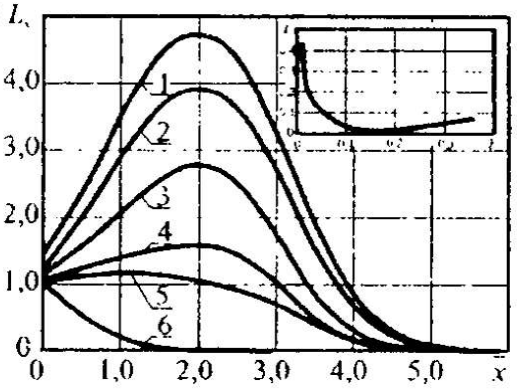
4.1а $\bar{u}_*$



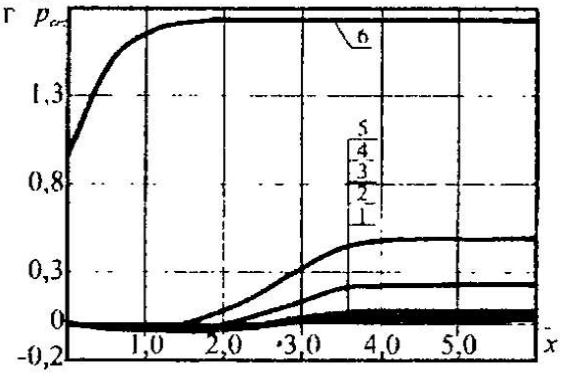
4.1б $\bar{y}_*$



4.1в $\bar{L}_*$

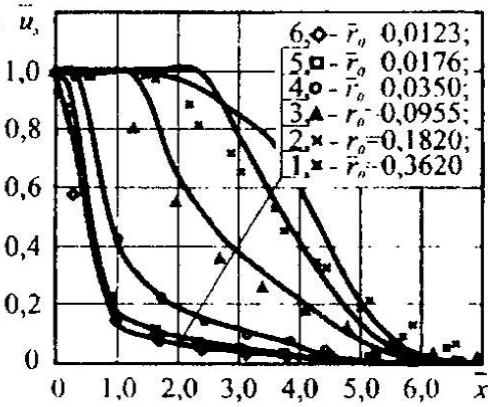


4.1г $\bar{p}_{o*}$

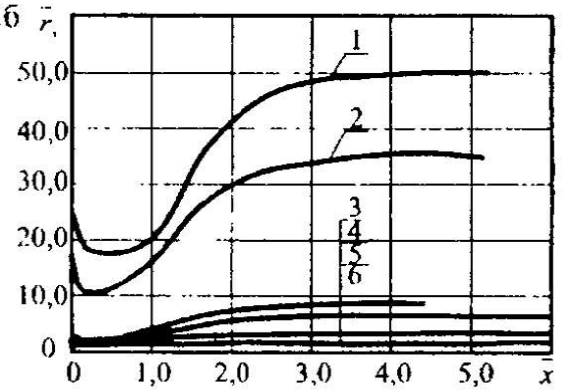


4.2 Осесимметричная струя в тупике
(схема - рис.1а)

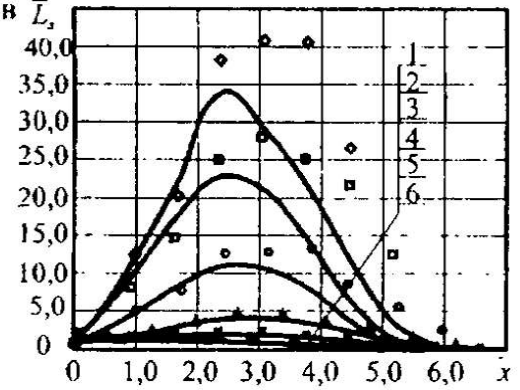
4.2а $\bar{u}_*$



4.2б $\bar{r}_*$



4.2в $\bar{L}_*$



4.2г $\bar{p}_{o*}$

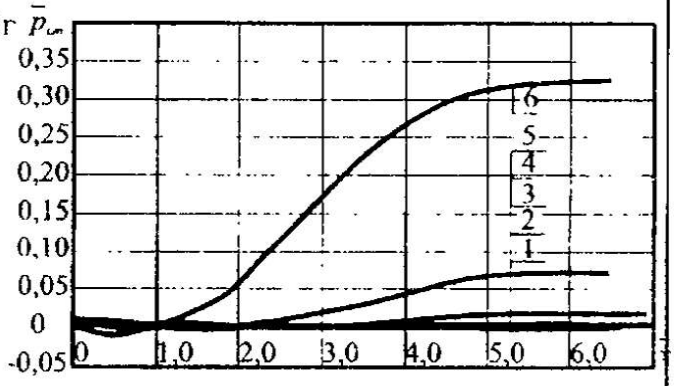
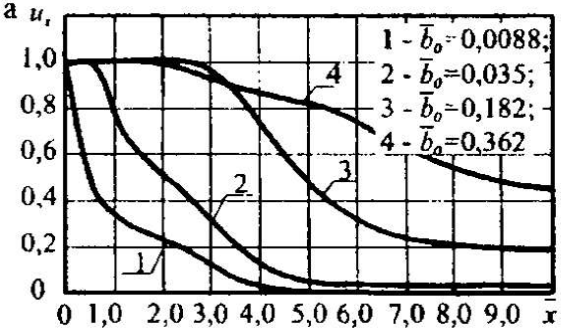


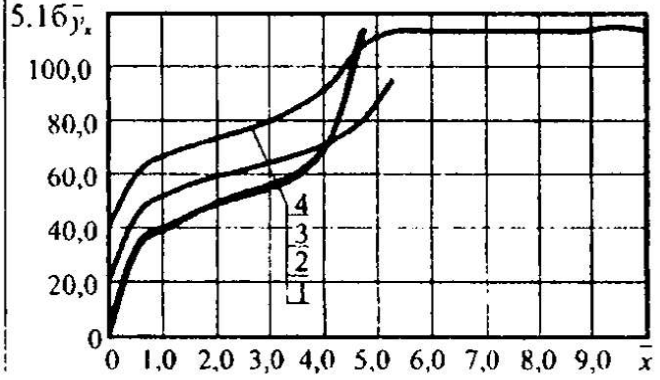
Рис. 4

5.1 Плоская струя в проточном канале (схема - рис.1в)

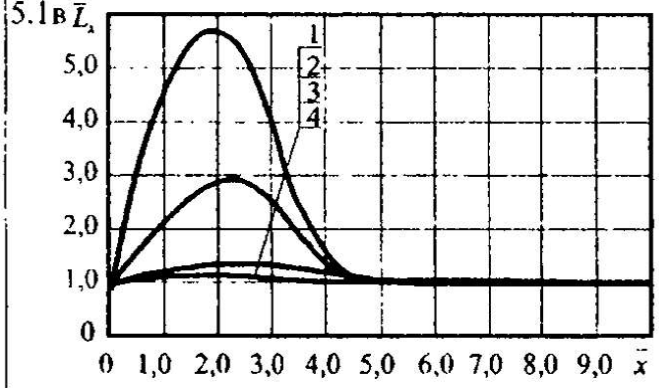
5.1а $\bar{u}_x$



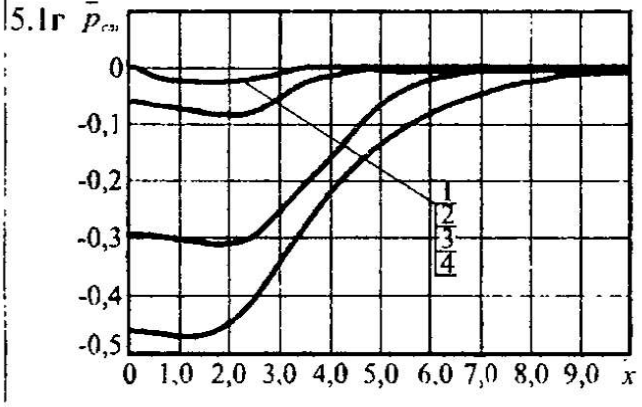
5.1б $\bar{y}_x$



5.1в $\bar{L}_x$

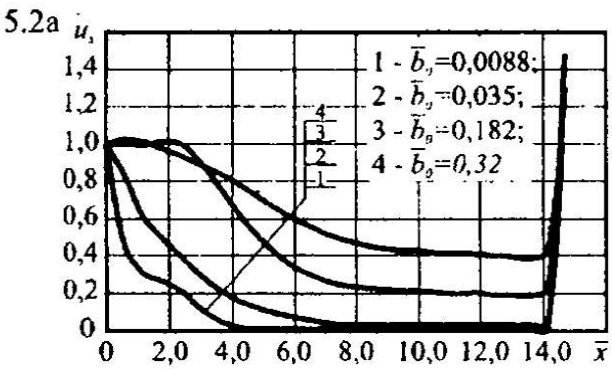


5.1г $\bar{p}_{cm}$

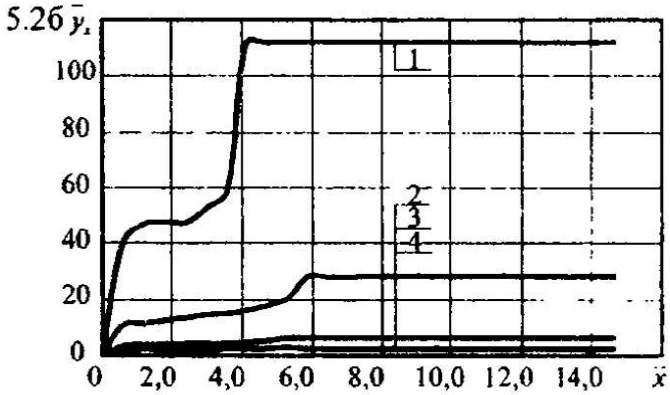


5.2 Плоская струя в тупике при несоосном расположении приточного и вытяжного отверстий (схема - рис. 1г)

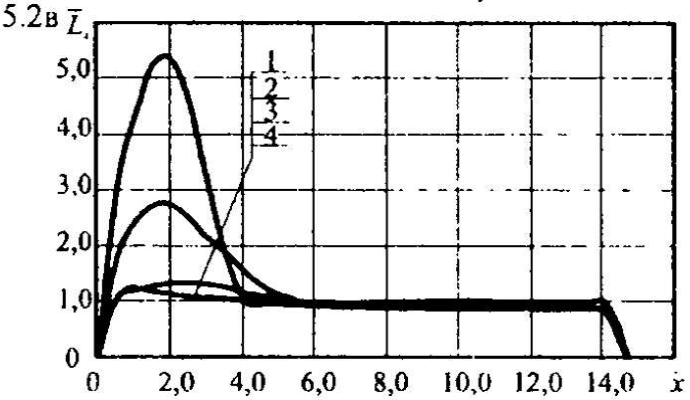
5.2а $\bar{u}_x$



5.2б $\bar{y}_x$



5.2в $\bar{L}_x$



5.2г $\bar{p}_{cm}$

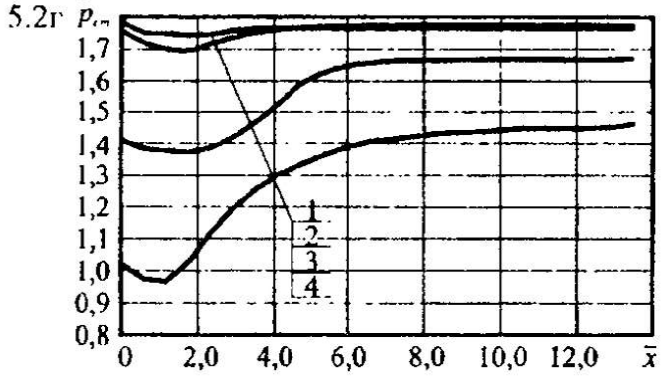


Рис. 5

В **четвертой главе** диссертации проводится аналитическое решение задачи о течении в зоне разворота плоской струи в тупике.

Для решения используется расчетная схема, предложенная в работе Г.Н. Абрамовича (рис.7а), который полагал, что воздух здесь ведет себя как идеальная жидкость, течение потенциальное.

На рисунке рис. 7 а отрезок AFC – ось тупика, отрезки OF и OK - начало и конец зоны разворота, линия тока - разрез AOM разделяет струю и обратный поток. В бесконечно удаленных точках A и M располагаются источник и сток интенсивностью L/2 (L – расход воздуха в сечении FO, где ширина струи максимальна). Детали течений до и после разворота не учитываются. Разворот происходит в подобласти, ограниченной отрезками OKDCFO. Отрезок CD или твердая стенка, если тупик короткий или сечение, соответствующее дальнобойности струи, если тупик «длинный». Тогда длина зоны разворота $l = x_4 - x_1$.

Для решения используется теория функций комплексной переменной. Отобразим область течения в физической плоскости $z = x + iy$ на верхнюю полуплоскость $t = \xi + i\eta$ с указанным на рисунках рис.6 а, рис.6 б соответствием точек. В плоскости t имеем простое течение (сток в начале координат – точка M и источник на бесконечности в точке A), комплексный потенциал которого:

$$W = -(L/2\pi)\ln t \qquad (7)$$

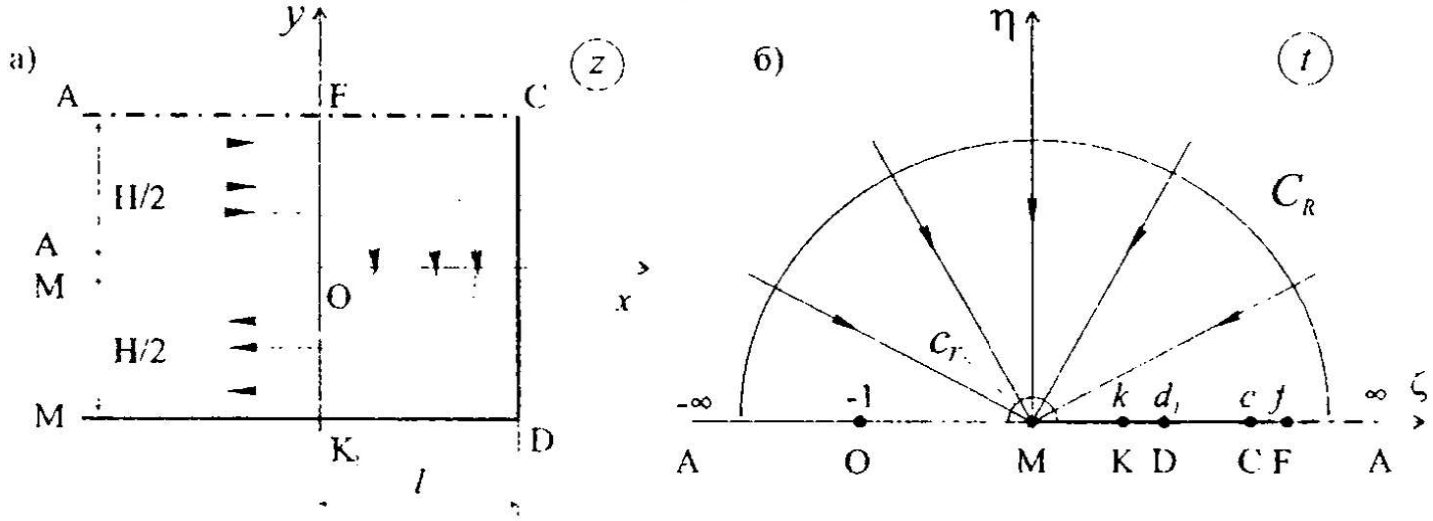


Рис. 6

Отображение $z = z(t)$ находится с помощью формулы Кристоффеля – Шварца, которая в нашем случае имеет вид

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{H}{2\pi}\cdot\frac{t+1}{t\sqrt{(t-d)(t-c)}};\; z = C_1\int\frac{(t+1)dt}{t\sqrt{(t-d)(t-c)}} + C_2 = C_1\int_{-1}^{t}\frac{(t+1)dt}{t\sqrt{(t-d)(t-c)}}, \qquad (8)$$

где C_1, d, c - неизвестные параметры отображения, которые находятся с помощью теории вычетов:

$$C_1 = -H\sqrt{dc}/2\pi,\; c = \left(\left(1+e^{\frac{\pi l}{H}}\right)\Big/\left(1-e^{\frac{\pi l}{H}}\right)\right)^2,\; d = \left(\left(1-e^{\frac{\pi l}{H}}\right)\Big/\left(1+e^{\frac{\pi l}{H}}\right)\right)^2$$

Используя формулы (7) и (8) определяем комплексную сопряженную скорость в параметрической плоскости t:

$$\frac{dW}{dz} = v_x - iv_y = \frac{dW}{dt}\frac{dt}{dz} = \frac{L}{H}\frac{\sqrt{(t-d)(t-c)}}{t+1}. \qquad (9)$$

Уравнения (8) и (9) дают полное решение задачи.

На отрезке FC (ось течения) где $z = x + iH/2$, $dW/dz = v_x$

$$x = -\frac{H}{2\pi}\left[2\ln\sqrt{t-d} + \sqrt{t-c} + 2\ln\left(\sqrt{ct-1} + \sqrt{dt-1}\right) - \ln t - 4\ln\left(\sqrt{1+d} + \sqrt{1+c}\right)\right] \qquad (10)$$

При $x=0$ отсюда определяем координату точки F($t=f$). Далее задавая значение t в интервале $c \le t \le f$ по уравнениям (9) и (10) находим распределение скорости на FC, CD.

Рис. 7 иллюстрирует результаты расчета относительной скорости для тупиков разной длины по приведенным выше формулам.

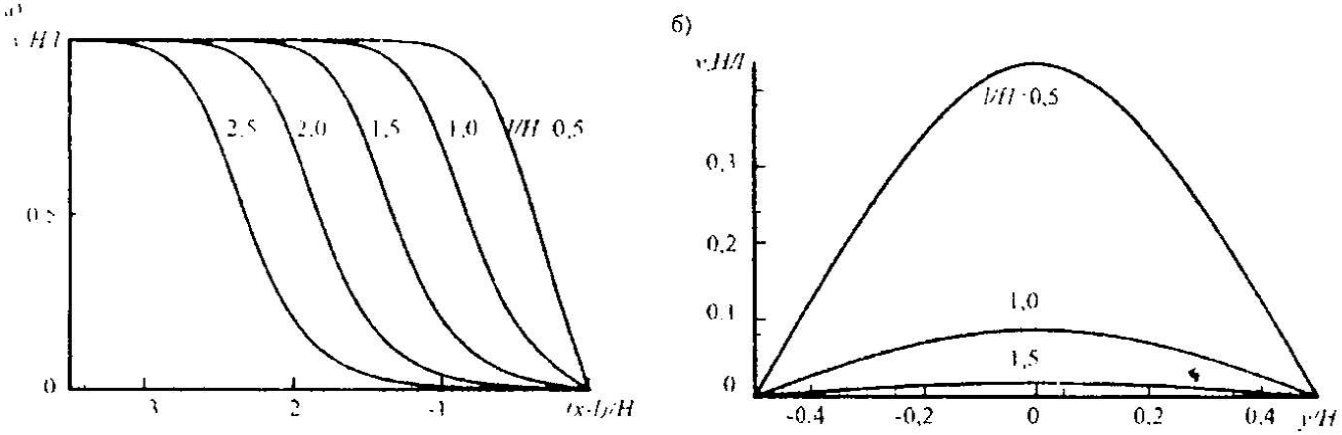


Рис. 7 а) отрезок FC, б) отрезок CD.

Другой вариант решения получен методом последовательных отображений, без использования формулы Кристофеля-Шварца.

В результате найдена формула отображения, связывающая области течения в плоскостях W и z в виде

$$\frac{dW}{dz} = -iL\frac{cth\,\pi z'}{\sqrt{q(z')}} \qquad (11)$$

где $z' = x' + iy' = (x - l)/H + iy/H$, $q(z') = \frac{sh^2\pi k}{sh^2\pi z'} - 1$, $k = l/H$.

Из (11) в частности находим:
скорость на отрезке FC

$$v_x(\bar{x}) = -\frac{L}{H}\frac{sh\,\pi x'}{\sqrt{ch^2\pi x' + sh^2\pi k}} \qquad (12)$$

на отрезке CD

$$v_y = -\frac{L}{H}\frac{cos\,\pi y'}{\sqrt{sin^2\pi y' + sh^2\pi k}} \qquad (13)$$

Вычисления по формулам, полученным разными способами дают одинаковые результаты. Второй способ решения задачи приводит к явным выражениям для v_x и v_y, что несомненно предпочтительнее.

Представлено сравнение результатов, полученных аналитически (и численным методом для «среднего» и «короткого» тупиков. Некоторое различие аналитического и численного решения можно объяснить тем, что в аналитическом решении детали течения до зоны разворота не учитывается. В численном решении, область течения рассматривается целиком.

В **пятой главе** диссертации численно определяются характеристики плоской неизотермической струи в тупике (схема – рис. 1а). Геометрия задачи и условия истечения такие же, как и для плоской изотермической струи-источника. Начальная температура принята $T_0 = 313\ K$. Малые значения $\Delta T_0 = T_0 - T_c = 313 - 293 = 20\ K$ и соответственно критерия Архимеда $Ar_0 = \frac{gb_0}{u_0^2}\cdot\frac{\Delta T_0}{T_c} = 3{,}6\cdot 10^{-7}$ выбраны затем, чтобы струя заметно не деформировалась.

Результаты расчетов представлены в безразмерном виде. В качестве масштабов приняты соответствующие характеристики «слабонеизотермической» свободной струи. В качестве линейного масштаба принята высота тупика.

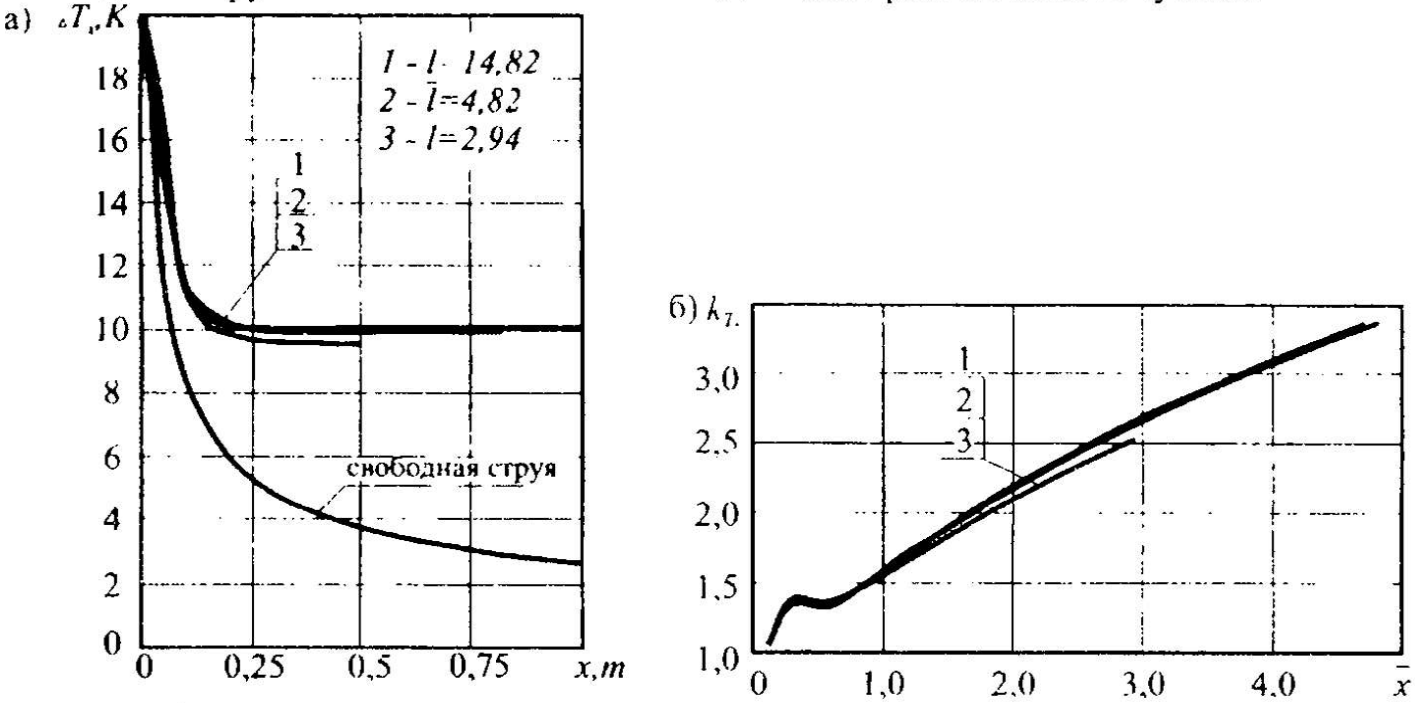


Рис. 9 Изменение избыточной температуры на оси струи для трех длин тупика

Рис. 9 показывает, как изменяется осевая избыточная температура по длине струи. Для тупиков разной длины характерно быстрое падение ΔT_x на расстоянии $\bar{x} < 0.2$, после чего ΔT_x практически не изменятся. На этом же рисунке нанесена кривая построенная по формуле для свободной «слабонеизотермической» струи. Видно, что падение ΔT_x по длине свободной струи происходит заметно интенсивнее.

Кривые для множителя k_{l_1} приведены на рис. 9б. В диапазоне расстояний $0,5 < \bar{x} < \bar{x}_0$ зависимость $k_{T_1} = k_{T_1}(\bar{x}) = \Delta T^{cm}/\Delta T^{cb}$ достаточно точно аппроксимируется формулой, пригодной для тупика любой длины

$$k_{T_1} = 0,001\bar{x}^{-3} - 0,035\bar{x}^{-2} + 0,64\bar{x} + 1,02 \qquad (13)$$

Полученные результаты показывают, что кинематика течения «слабонеизотермической» струи-источника импульса практически не отличается от изотермической. Здесь также фактор продольного стеснения сказывается только в случае когда $l \le \bar{x}_0$.

В **шестой главе** диссертации на основе результатов исследования, предлагается методика расчета подачи воздуха изотермическими осесимметричными и плоскими струями: поверочный («прямой») и конструкторский («обратный») расчеты.

При проведении поверочного расчета при известных размерах помещения (АхВхН); заданных условиях истечения: начальной скорости воздуха, площади сечения приточного отверстия, выбранных типе и количестве воздухораспределителей, определяется скорость движения воздуха в рабочей зоне и устанавливается соответствие с нормируемой величиной u_x''.

При проведении конструкторского расчета при известных размерах помещения (АхВхН), заданном расходе приточного воздуха L_0, кинематических характеристиках воздухораспределителей (m) и нормируемых условиях в рабочей зоне: скорость движения воздуха u_x'', определяется площадь приточного отверстия и скорость воздуха на истечении u_0.

По приведенной методике проведены расчета воздухораспределения в помещениях лабораторно-бытового корпуса на ОАО "КЗСК-Силикон" и гаражных боксов для хранения автомобилей на газовом топливе. Для сравнения рассмотрено три варианта подачи и удаления воздуха. Выбрана необходимая схема подачи и удаления воздуха и определены условия истечения, обеспечивающие нормируемые условия в рабочей зоне помещения.

Основные выводы по диссертационной работе:

- определена схема численного решения задач о струйном течении в ограниченном пространстве с использованием вычислительного комплекса *Fluent*;
- установлено и исследовано влияние параметров поперечного и продольного стеснения, а также схем подачи и удаления воздуха на закономерности развития струй в тупиковом и проточном каналах;
- предложены расчетные и графические зависимости для определения координат границ и характерных сечений струй, распределения скоростей, температур и давлений, а также расходов в сечениях струй;
- выявлено существенное влияние эжекции воздуха через проницаемый торец тупикового канала на характеристики струй;

– методом конформных отображений проведено исследование течения в зоне разворота плоской струи в тупике конечной длины;

полученные зависимости положены в основу методики расчета воздухораспределения в вентилируемых помещениях, учитывающей стесняющее влияние ограждений.

Основные публикации по теме диссертации.
Публикации в ведущих рецензируемых научно-технических журналах и изданиях:

1. Ю.Р. Кареева Численное исследование струйного течения в ограниченном пространстве / В.Н. Посохин, Р.Г. Сафиуллин // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. –2012. –№2. С. 30-34.
2. Ю.Р. Кареева Численное исследование осесимметричной струи, истекающей из отверстия конечного размера в цилиндрический тупик / В.Н. Посохин // ИВУЗ. Проблемы энергетики. – 2012. №11-12. – С. 27-32.
3. Ю.Р. Кареева Численное определение характеристик течения в проточном канале / В.Н. Посохин, Р.Г. Сафиуллин //. Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №6. – С. 75-76.

Отраслевые издания и материалы конференций:

4. Ю.Р. Кареева Осесимметричная турбулентная струя в тупике / В.Н. Посохин. // ИВУЗ. Строительство. – 2011. – №3. – С.64-70.
5. Ю.Р. Кареева Плоская стесненная струя в тупике / В.Н. Посохин, А.М. Зиганшин // журн. Региональная архитектура и строительство. – 2011. –№1. – С.124-130.
6. Ю.Р. Кареева К расчету плоской стесненной струи в тупике / Д.В. Маклаков, В.Н. Посохин // журн. Региональная архитектура и строительство. – 2011. –№1. – С.130-135.
7. Ю.Р. Кареева Численное исследование плоской струи в тупиках разной длины при соосном расположении приточного и вытяжного отверстий / В.Н. Посохин // Известия КазГАСУ. – 2011. –№2 (16). – С.161-165.
8. Ю.Р. Кареева Характеристики турбулентной плоской струи в тупике при разном расположении приточного и вытяжного отверстий / В.Н. Посохин // ИВУЗ. Строительство. –2011. – №7. С.27-33.
9. Ю.Р. Кареева К расчету осесимметричной струи в тупике / В.Н. Посохин // Вестник МГСУ. –2011 - №7. – С. 326 – 330.
10. Ю.Р. Кареева Численное исследование плоской струи, истекающей из щели конечного размера в тупик / В.Н. Посохин // Известия КазГАСУ. – 2012. – №2 (20). – С.135-140.
11. Ю.Р. Кареева К расчету полуограниченной плоской струи, натекающей на преграду / А.М. Зиганшин // Сб. докладов третьей международной научно – технической конференции конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». Москва. – 2009. – С. 202 – 203.

12. Ю.Р. Кареева Численный расчет пристенных струй / А.М. Зиганшин // Сб. трудов международной научно – технической конференции студентов. магистрантов. аспирантов. Тольятти. - 2009. - С. 246 - 249.
13. Ю.Р. Кареева К расчету плоской струи в тупике. / А.М. Зиганшин // Труды международной научно практической конференции «Инженерные системы - 2010». Москва. - 2010. – С. 268 269.
14. Ю.Р. Кареева К расчету стесненной осесимметричной струи / В.Н. Посохин. А.М. Зиганшин // Материалы VIII международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды». Волгоград. --2010. - С. 479 482.
15. Ю.Р. Кареева Численное исследование плоской турбулентной струи в тупике при соосном расположении приточного и вытяжного отверстий / В.Н. Посохин // Сб.тр. XII Международной конференции «Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах». Пенза. 2011. С.19-24.
16. Ю.Р. Кареева Характеристики плоской турбулентной струи в тупиках разной длины / В.Н. Посохин // Материалы IX Международной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей стреды». 17-2.05.2011, г.Кошалин. Волгоград: ВолгГАСУ, 2011. – С.272-276.
17. Ю.Р. Кареева Плоская струя. истекающая из щели конечного размера в тупик / В.Н. Посохин // Материалы X Международной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды». 12-20.05.2012. г.Буданешт. Волгоград: ВолгГАСУ, 2012. С.178-183.
18. Ю.Р. Кареева Характеристики плоской струи в тупике при несоосном расположении приточного и вытяжного отверстий / В.Н. Посохин, А.В.Баталова // Материалы XI Международной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды». - 23.03-05.04.2013. г.Ханой. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. с. 194-200.

Подписано в печать 24.04.15 Формат 60x84/16 Печать RISO
Заказ № 172 Объем 1,0 печ.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в полиграфическом секторе Издательства КГАСУ.
420043, Казань, ул. Зеленая, 1.