



ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХОРДАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ С ВИХРЕВЫМ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

Шайхутдинов Я.О., Павлов Г.И., Халиулин Р.Р., Теляшов Д.А., Тихонов О.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н. Туполева–КАИ, г. Казань, Россия
jara2105@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Основным элементом блочных горелок является сопловой блок, от которого зависит эффективность и надежность работы горелочного устройства. Большая часть серийно выпускаемых сопловых блоков имеет в своей конструкции диск с закручивающими лопатками для турбулизации потока, однако такие диски создают значительное газодинамическое сопротивление. *ЦЕЛЬ.* Исследование влияния углов подачи горючего газа (угол к оси β и угол хорды α) на распределение газа по сечениям цилиндра, степень закрутки потока и степень разрежения с принудительной подачей воздуха осевым вентилятором без использования закручивающих дисков. *МЕТОДЫ.* Исследования проводились численным методом для изотермических струй и потока в программном комплексе ANSYS Fluent с использованием модели турбулентности SST $k-\omega$. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Установлено, что минимальный коэффициент вариации для всех рассмотренных конфигураций обеспечивается при вихревом числе порядка $S=0,4-0,5$. Степень разрежения зависит от комбинации углов β и α , максимальное разрежение было достигнуто при $\beta = 90^\circ/\alpha = 15^\circ$. Скорость крутки зависит как от вихревого числа S , так и от комбинации углов β и α , причем для каждого угла β существует собственный диапазон изменения S для поддержания максимальной скорости крутки. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Найдена конфигурация ($\beta = 90^\circ/\alpha = 26^\circ$) для достижения компромисса между высокой степенью крутки ($S=0,58-0,48$), протяженной зоной разрежения (с пиковой точкой -433 Па) и равномерным распределением газа в сечениях соплового блока: коэффициент вариации изменялся в пределах от 41% (1 калибр от точки ввода) до 13% (выходное сечение) Результаты работы имеют практическую ценность для проектирования горелочных устройств и проведения дальнейших расчетов с использованием модели горения.

Ключевые слова: CFD-моделирование; хордальные струи; сопловой блок; осевой вентилятор.

Для цитирования: Шайхутдинов Я.О., Павлов Г.И., Халиулин Р.Р., Теляшов Д.А., Тихонов О.А. Исследование газодинамических процессов взаимодействия хордальных газовых струй с вихревым воздушным потоком // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 156-167. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-156-167.

STUDY OF GAS-DYNAMIC PROCESSES OF INTERACTION OF CHORDAL GAS JETS WITH A VORTEX AIR FLOW

Shaikhutdinov Y.O., Pavlov G.I., Khaliulin R.R., Telyashov D.A., Tikhonov O.A.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan,
Russia
jara2105@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The nozzle block is the important element of block burners, determining the efficiency and reliability of the burners. Most commercially available nozzle blocks incorporate a disk with swirl vanes to generate flow turbulence; however, such disks create significant gas-dynamic drag. *THE PURPOSE.* To study the influence of combustible gas feed angles (angle to the axis β and chord angle α) on gas distribution across the cylinder

cross-sections, the degree of flow swirl, and the degree of vacuum using forced air supply by an axial fan without the use of swirl disks. **METHODS.** The study was performed numerically for isothermal jets and flow in the ANSYS Fluent software package using the SST $k-\omega$ turbulence model. **RESULTS.** The minimum variation coefficient for all considered configurations was found to be achieved at a swirl number of about $S=0.4-0.5$. Vacuum pressure depends on the combination of angles β and α , the maximum was achieved at $\beta = 90^\circ/\alpha = 15^\circ$. The swirl rate depends on both the swirl number S and the combination of angles β and α , with each angle β having its own range of S variation to maintain the maximum swirl rate. **CONCLUSION.** A configuration ($\beta = 90^\circ/\alpha = 26^\circ$) was found to achieve a compromise between a high swirl ($S=0.58-0.48$), an extended low-pressure zone (with a peak point of -433 Pa) and uniform gas distribution in the sections of the nozzle block: variation coefficient varied within the range from 41% (1 caliber from the inlet section) to 13% (outlet section). The results of the work are of practical value for the design of burner devices and further calculations using the combustion model.

Keywords: CFD modeling; chordal jets; nozzle block; axial fan.

For citation: Shaikhutdinov Y.O., Pavlov G.I., Khaliulin R.R., Telyashov D.A., Tikhonov O.A. Study of gas-dynamic processes of interaction of chordal gas jets with a vortex air flow. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 156-167. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-156-167.

Введение (Introduction)

Вихревые методы сжигания топлива привлекают внимание благодаря способности обеспечивать стабильное горение с низкими выбросами [1]. Закрутка потока (подача воздушного потока с тангенциальной составляющей скорости) создает в камере сгорания центральную рециркуляционную зону, которая стабилизирует пламя. Это повышает полноту сгорания топлива и устойчивость пламени, позволяя эффективно сжигать даже низкокалорийные и бедные газозвоздушные смеси. В камерах сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) применение вихревых стабилизаторов уже давно стало стандартом для предварительного перемешивания топлива с воздухом и стабилизации диффузионного пламени. Евдокимов О.А. в своей работе [2] отмечает, что формирование вихревой структуры течения (например, противоточной вихревой зоны) ведёт к высокой устойчивости горения, экологичности и топливной гибкости системы. Таким образом, вихревое сжигание рассматривается как перспективная технология для камер сгорания и горелочных устройств, отвечающая современным требованиям по снижению оксидов азота (NO_x) и углерода (CO) при одновременном расширении диапазона устойчивой работы.

Вихревое число S (безразмерный параметр, характеризующий отношение тангенциального вращения к осевому потоку) является определяющим для структуры вихревого течения. При достижении критического значения S в потоке образуется центральная рециркуляционная зона (ЦРЗ). Экспериментально и численно показано, что порог возникновения обратного течения зависит не только от величины S , но и от распределения осевой скорости и числа Рейнольдса: более высокие осевые скорости могут задерживать появление вихревого распада при том же S . Большинству горелочных устройств достаточно средней интенсивности закрутки, чтобы сформировалась устойчивая приосевая рециркуляционная зона. Так, при $S = 0,6-0,7$ наблюдается завершающая стадия распада вихря с образованием единой ЦРЗ [3].

Центральная рециркуляционная зона действует как ядро стабилизации пламени, возвращая горячие газы обратно для поддержания горения. Помимо нее, в вихревых течениях могут возникать и внешние (пристенные) рециркуляционные области: например, в промышленных горелках с вихревым дутьем формируется одна центральная и две кольцевых зоны рециркуляции у головки горелки. За счет этого вихревые горелки обеспечивают быстрый розжиг, устойчивое горение и высокую степень выгорания топлива. Увеличение закрутки потока обычно интенсифицирует турбулентность и улучшает перемешивание топлива с окислителем, однако чрезмерно большое вихревое число может приводить к негативным явлениям. Так, при крайне сильной закрутке возможно прилипание потока к стенкам камеры и появление нескольких коаксиальных зон обратного течения вместо одной [4]. Кроме того, отмечены случаи, когда чрезмерное увеличение S вызывает эффект, при котором пламя начинает двигаться против потока в

сторону форсунки [5]. На практике, в лабораторных горелках малой мощности обычно применяют лопаточные завихрители, создающие $S \sim 0,5-1,0$, что дает короткое ярко выраженное ядро горения и минимизирует выбросы NO_x за счет интенсивной внутренней рециркуляции.

В вихревых потоках качественное перемешивание достигается благодаря интенсивным турбулентным пульсациям и вторичным вихрям. Так, в исследовании [6] с помощью метода крупных вихрей [7] анализировались показатели перемешивания метано-водородной смеси при различных числах закрутки. Установлено, что увеличение S (от 0,3 до 0,7) в нереагирующем закрученном потоке приводит к росту степени перемешанности – уменьшается объем области стехиометрической смеси и снижается интенсивность сегрегации топлива и окислителя. Другими словами, более сильная закрутка дробит крупномасштабные структуры потока, способствуя лучшей однородности смеси.

Зарубежными авторами проводится большое количество исследований, связанных с изучением влияния вихревого числа, геометрических параметров горелок и других характеристик потока на интенсивность тепло- и массообмена в различных экспериментальных установках. Еще одной значимой работой является исследование, в котором проводились эксперименты с различными значениями вихревого числа в миниатюрной горелке. Установлено, что при больших значениях S (порядка 0,6-0,7) устойчивость пламени ухудшается по сравнению с $S=0,5$ [8].

Исследование в работе [9] направлено преимущественно на изучение влияния геометрических параметров горелки и подбор оптимального угла установки вихревых пластин для уменьшения выбросов NO_x . Похожее исследование проводились авторами [10], которые моделировали работу промышленной горелки с обратным диффузионным пламенем. В рамках данной работы было определено оптимальное количество форсунок и их угол наклона относительно оси для улучшения условий горения и снижения выбросов NO_x .

Одним из важных направлений совершенствования вихревых горелок является подбор углов ввода топлива в закрученный воздушный поток для достижения необходимых параметров. Традиционно применяются две схемы: аксиальный впрыск (топливо подается вдоль оси потока) и тангенциальный (по касательной к окружности). Хордальная подача представляет собой промежуточный вариант: газовые струи вводятся под углом к оси и под углом к радиусу, то есть по хордам окружности соплового блока. Геометрически такая подача характеризуется двумя углами – углом к оси β и углом хорды α (угол между радиусом и направлением сопла) [11]. Изменение этих углов существенно влияет на характер течения: струи одновременно должны проникать к центру вихря, но при этом способствовать закрутке. При различных комбинациях β и α можно добиться значительной закрутки потока, получить эффект эжекции и обеспечить равномерное распределение газа в сопловом блоке.

Результаты исследования [11] также свидетельствуют о том, что использование хордальной подачи газовых струй способствует надежному воспламенению горюче-воздушной смеси и высокой стабилизации факела пламени при работе горелки. При этом такая подача позволяет снизить гидравлическое сопротивление при сохранении турбулентных характеристик потока. Вследствие этого, появляется возможность замены центробежного вентилятора на осевой, который отличается существенно меньшим энергопотреблением.

Однако на данный момент в открытом доступе крайне мало информации, касающейся исследования взаимодействия хордальных струй с закрученным воздушным потоком.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для исследования газодинамических процессов взаимодействия хордальных газовых струй с вихревым воздушным потоком была создана математическая модель камеры смешения с четырьмя соплами. Изменяемыми параметрами являлись углы наклона осей струй к оси камеры β и углы хорд α . Вихревой воздушный поток создавался центробежным осевым вентилятором *SHUFT CFs 160S*.

Численное моделирование проводилось в программном комплексе *ANSYS Fluent* [12]. Предварительная 3D-модель вентилятора и соплового блока была смоделирована в системе автоматизированного проектирования «КОМПАС-3D». Длина соплового блока принята в размере 5 калибров, подвод газа осуществлялся на расстоянии 1 калибра от выходного сечения корпуса вентилятора. Полученная модель представлена на рисунке 1.

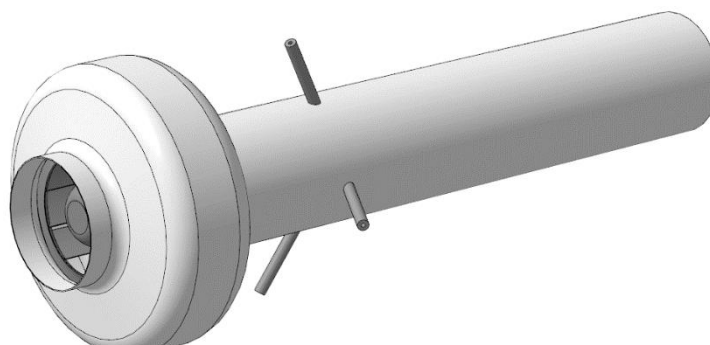


Рис. 1. 3D-модель соплового блока с осевым вентилятором Fig. 1. 3D model of a nozzle block with an axial fan

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для моделирования использовалась гексаэдрическая сетка со ступенчатым изменением размера ячеек, минимальный размер в 0,5 мм принят на патрубках ввода газа. В результате моделирования сетки общее количество элементов составило порядка 1,9-2 млн. В общей сложности расчет проходил в 8000-9000 итераций для каждого варианта до момента достижения устойчивого состояния системы, при котором изменение тангенциальной скорости в сечениях отличалось менее чем на 1-3% каждые 100 итераций в течение последних 500 итераций. Для расчетов была выбрана модель $k-\omega$ SST. Эта модель сочетает точность $k-\omega$ у стенки и устойчивость $k-\epsilon$ во внешнем потоке, что делает её оптимальной для задач с развитой рециркуляцией [13].

В качестве граничных условий на входе вентилятора (*inlet1*) приняты его паспортные характеристики: массовый расход воздуха (*Mass-Flow inlet*) 0,281 кг/с (при 300 К). Вокруг лопастей вентилятора сформирована зона *Multiple Reference Frame (MRF)*, скорость вращения лопастей – 2500 об/мин. Массовый расход газа (пропана) через сопла (*inlet2*) принят в размере 0,017 кг/с (*Mass-Flow inlet*), который соответствовал стехиометрическому соотношению. Подавался газ среднего давления порядка 17 кПа (изб.). В выходном сечении (*outlet*) задано атмосферное давление (*pressure-outlet*). Для каждой комбинации углов β и α были приняты идентичные условия расчета.

Достоверность используемой модели была доказана путем сравнения полученных результатов с замераами на экспериментальном стенде. В работе [14] представлено подробное описание стенда и результаты сравнения.

Расчеты проводились с разными углами подачи газа как к оси соплового блока, так и к радиусу – углами между радиусом (проведённым из центра в точку касания – точку присоединения патрубков газа) и хордами (так называемой угол хорды). Таким образом были сформированы следующие варианты задач:

- угол к оси соплового блока составлял: 60, 75, 90°;
- для каждого из приведенных углов задавался угол хорды: 0, 15, 26, 30, 45°.

Предельные значения углов наклона 60° (к оси соплового блока) и 45° (к радиусу камеры смещения) задавались на основе априорной информации, полученной в ходе предварительных исследований. Замечено, что при углах, отличных от указанных значений ($\beta < 60^\circ$ и $\alpha > 45^\circ$), газ при истечении в вихревой воздушный поток «прижимается» к внутренней стенке и практически не проникает в центр.

Схема расположения газовых сопел в камере смещения приведена на рисунках 2-3.

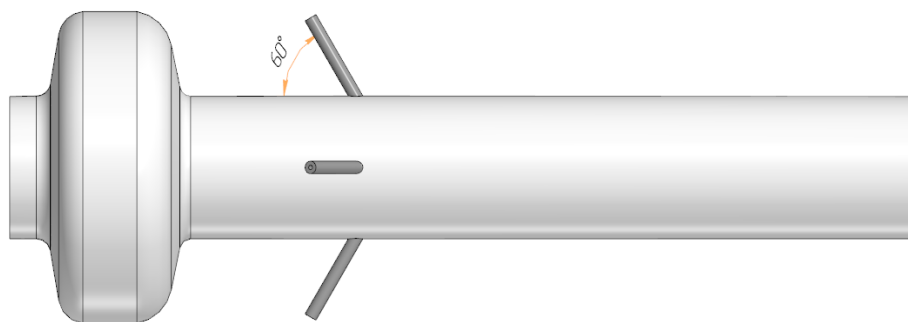


Рис. 2. Угол к оси

Fig. 2. Angle to the axis

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

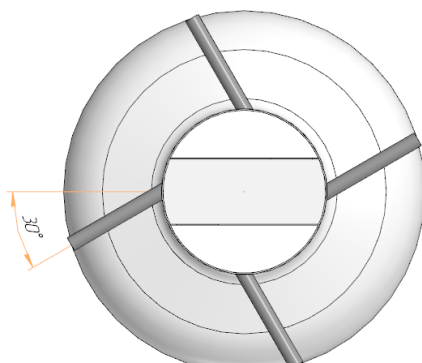


Рис. 3. Угол хорды

Fig. 3. Chord angle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По результатам расчета анализировались следующие параметры:

1) Равномерность распределения газа в сопловом блоке на расстоянии 1-4 калибров от точки ввода, где расстояние в 4 калибра – выходное сечение. Для оценки данного параметра использовался коэффициент вариации, измеряемый чаще всего в процентных долях и зависящий от стандартного отклонения и среднего значения массовой доли пропана в каждом рассматриваемом сечении:

$$CV = \frac{\sigma}{M_{cp}} \cdot 100\%,$$

где σ – стандартное отклонение массовой доли пропана в каждом сечении;

M_{cp} – средняя массово-взвешенная доля пропана в каждом сечении.

Чем ближе CV к нулевому значению, тем равномернее распределен газ по сечению. Данный показатель являлся приоритетным в рамках текущего исследования.

2) Интенсивность закрутки газозвдушного потока оценивалась по безразмерному вихревому числу:

$$S = \frac{\int_0^R wu r dr}{R \int_0^R uu r dr},$$

где w, u – тангенциальная и осевая скорость, соответственно, м/с;

r – расстояние от оси, м;

R – радиус канала, м.

3) Разрежение в камере смешения оценивалось по величине статического давления в приосевой зоне камеры в районе 0,5-1 калибра от точки ввода газа.

4) Глубина проникновения хордальных газовых струй в воздушный поток оценивалась по массовой доле газа на оси соплового блока в каждом сечении.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

В качестве примера рассмотрим подробно результаты расчета, полученные для угла $\beta=60^\circ$. Дисбаланс массового расхода на входе/выходе в камеру смешения варьировался от $4,1 \cdot 10^{-5}$ до $9,7 \cdot 10^{-5}$ кг/с, что соответствует 0,014-0,032% от суммарного массового расхода на входе (0,298 кг/с).

Таблица 1

Table 1

Значение тангенциальной скорости при угле наклона оси хордальной струи к оси камеры смешения 60°

The value of the tangential velocity at an angle of inclination of the chordal jet axis to the mixing chamber axis of 60°

Угол хорды	Тангенциальная скорость, м/с, калибров от точки ввода газа				Увеличение скорости в выходном сечении, %
	1	2	3	4	
0°	7,56	7,09	6,34	5,81	–
15°	9,42	8,65	8,06	7,32	25,97
26°	10,67	9,79	9,23	8,23	12,47
30°	11,10	10,42	9,67	8,60	4,53
45°	11,31	10,61	10,01	8,85	2,89

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 2

Table 2

Значение вихревого числа при угле наклона оси хордальной струи к оси камеры смешения 60°
 The value of the swirl number at an angle of inclination of the chordal jet axis to the mixing chamber axis of 60°

Угол хорды	Вихревое число, калибров от точки ввода газа			
	1	2	3	4
0°	0,34	0,35	0,33	0,32
15°	0,48	0,45	0,43	0,41
26°	0,60	0,54	0,51	0,47
30°	0,62	0,58	0,53	0,49
45°	0,67	0,61	0,56	0,51

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3

Table 3

Значение коэффициента вариации и давления разрежения в зоне подвода газа при угле наклона оси хордальной струи к оси камеры смешения 60°

The value of the coefficient of variation and the vacuum pressure in the gas supply zone at an angle of inclination of the chordal jet axis to the mixing chamber axis of 60°

Угол хорды	Коэффициент вариации CV, %, калибров от точки ввода газа				Статическое давление в зоне подвода газа, Па
	1	2	3	4	
0°	57,51	25,98	17,04	12,17	-118,11
15°	44,54	25,59	16,58	11,60	-157,09
26°	63,61	40,69	27,08	20,07	-171,69
30°	67,00	44,14	30,01	22,83	-126,18
45°	81,05	58,46	41,58	30,79	-96,92

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Изменение вихревого числа S вдоль оси соплового блока в графическом виде и показано на рисунке 4.

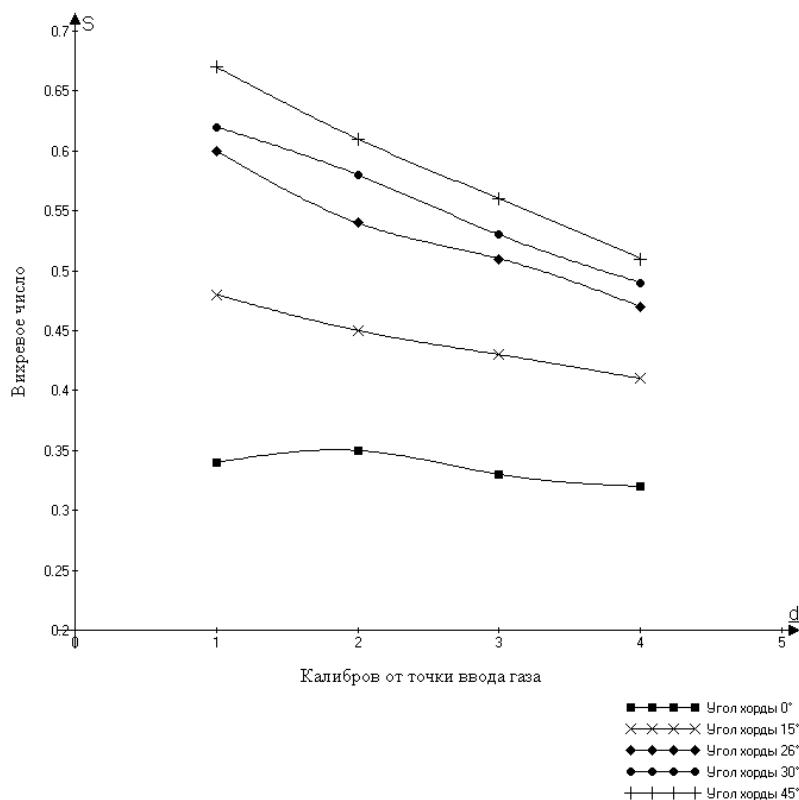


Рис. 4. Вихревое число при разных углах хорды Fig. 4. Swirl number at different chord angles

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 4
Table 4Массовая доля газа на оси сопла
Mass fraction of gas at the nozzle axis

Угол хорды	Массовая доля газа в точке на оси сопла, расстояние от плоскости расположения сопел до рассматриваемого сечения в калибрах			
	1	2	3	4
0°	0,0625	0,0506	0,0527	0,0564
15°	0,0106	0,0373	0,0467	0,0498
26°	0,0025	0,0227	0,0323	0,0370
30°	0,0012	0,0122	0,0281	0,0386
45°	0,0000	0,0048	0,0154	0,0255

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из таблиц 1 и 2, увеличение угла хорды способствует увеличению тангенциальной скорости, что также приводит к росту вихревого числа. Это характерно для каждого рассмотренного сечения. Наибольший рост тангенциальной скорости наблюдается при углах наклона осей газовых струй к радиусу 15 и 30°. Увеличение угла хорды выше 45° значительного влияния на тангенциальную скорость не оказывает. Такая тенденция наблюдалась также при углах наклона осей газовых струй к оси камеры смешения, составлявших 75° и 90°.

При увеличении угла хорды тангенциальная компонента скорости газоздушного потока в камере возрастает, однако его осевая составляющая уменьшается. Вследствие этого горючие газы на начальном участке канала концентрируются у периферии и формируют закрутку преимущественно вблизи стенок. Это хорошо видно из данных таблицы 4, согласно которым по мере увеличения угла хорды массовая доля пропана на оси соплового блока снижается, то есть глубина проникновения струи падает. Наиболее отчетливо это проявляется при заданном угле хорды 45° – горючий газ в центре камеры появляется лишь на удалении более 1 калибра от места ввода газовых струй.

Наибольшее давление разрежения, как видно из таблицы 3, наблюдается также на углах хорды 15° и 30°. При угле хорды 45° разрежение минимально и не имеет выраженной пиковой зоны – газ преимущественно распределен по периферии соплового блока. Наиболее равномерно зона разрежения распределена при угле хорды 30°. Целостную информативную картину распределения давления разрежения дают диаграммы распределения статического давления в сопловом блоке, которые для различных углов хорды приведены на рисунках 5-9. На них также видно, что зона разрежения с наибольшими значениями давления создается при углах наклона осей газовых сопел к радиусу 15° и 30°.

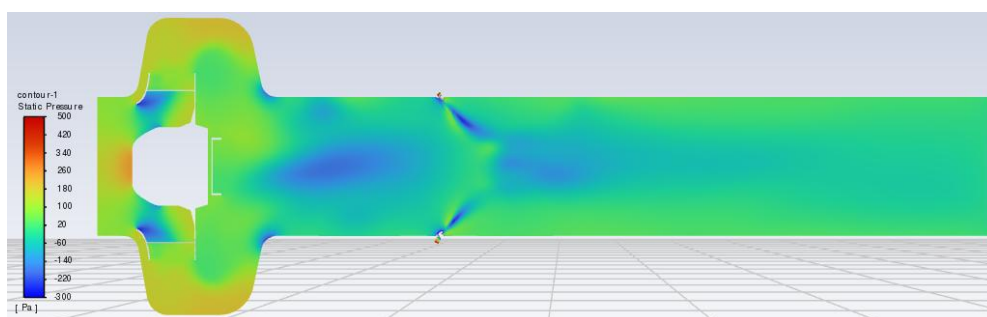


Рис. 5. Диаграмма распределения статического давления в сопловом блоке при угле хорды 0° Fig. 5. Static pressure distribution diagram in the nozzle block at a chord angle of 0°

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

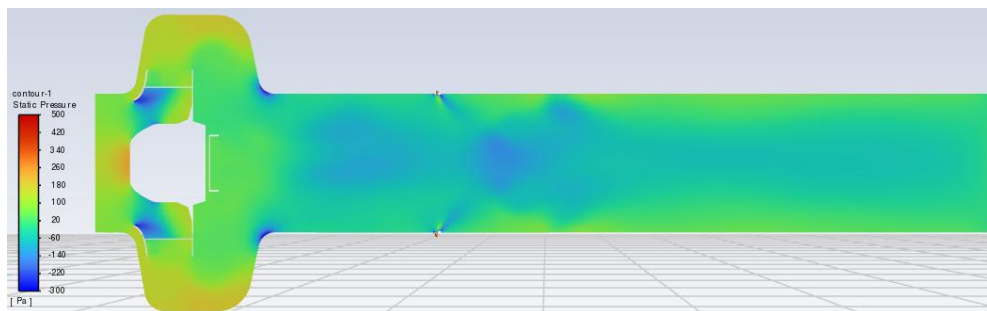


Рис. 6. Диаграмма распределения статического давления в сопловом блоке при угле хорды 15° Fig. 6. Static pressure distribution diagram in the nozzle block at a chord angle of 15°
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

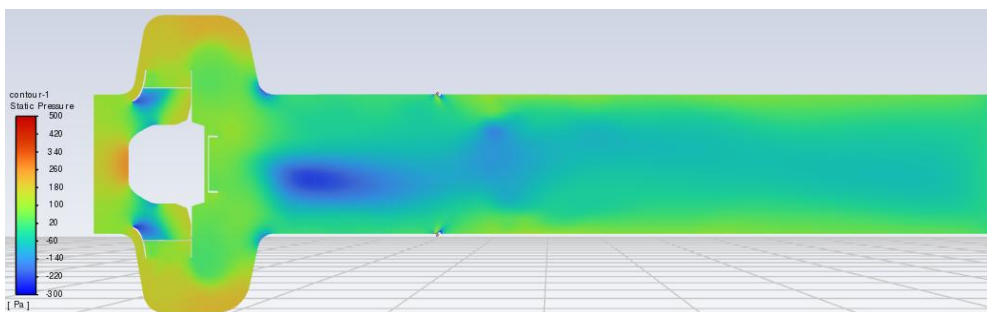


Рис. 7. Диаграмма распределения статического давления в сопловом блоке при угле хорды 26° Fig. 7. Static pressure distribution diagram in the nozzle block at a chord angle of 26°
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

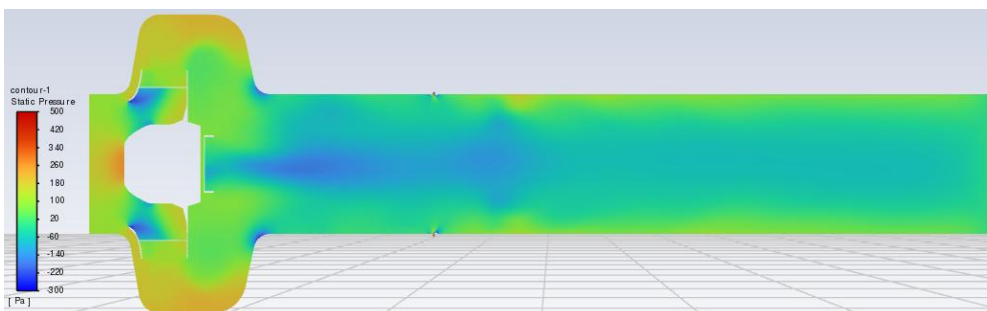


Рис. 8. Диаграмма распределения статического давления в сопловом блоке при угле хорды 30° Fig. 8. Static pressure distribution diagram in the nozzle block at a chord angle of 30°
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

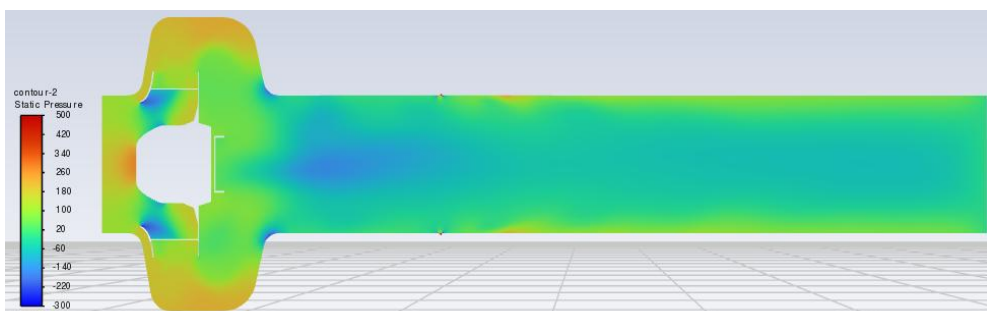


Рис. 9. Диаграмма распределения статического давления в сопловом блоке при угле хорды 45° Fig. 9. Static pressure distribution diagram in the nozzle block at a chord angle of 45°
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Особое внимание следует уделить коэффициенту вариации CV. Как видно из таблицы 3, наилучшее распределение массовой доли пропана во всех рассмотренных сечениях достигается при угле хорды 15° .

Аналогичные результаты были получены и для других вариантов задач. После анализа результатов расчета всех рассмотренных комбинаций углов было выявлено, что при использовании осевого центробежного вентилятора при заданном максимальном

расходе воздуха 0,281 кг/с:

1) Наиболее равномерное распределение горючего газа в вихревом воздушном потоке достигается при угле хорды $\alpha=15^\circ$ независимо от углов наклона осей струй к оси камеры смешения β . Для инжекционных смесителей, работающих без вентилятора, этот угол α составляет $22\div 25^\circ$ [15].

2) Наименьший коэффициент вариации достигается при поддержании вихревого числа вдоль соплового блока на уровне $S=0,5-0,4$.

3) Каждому углу β соответствует свой диапазон изменения вихревого числа, при котором наблюдается максимальная скорость крутки: для угла $\beta=60^\circ$ $S=0,67-0,51$; для угла $\beta=75^\circ$ $S=0,57-0,48$; для угла $\beta=90^\circ$ $S=0,56-0,5$. Изменение угла в пределах $75-90^\circ$ существенно не влияет на вихревое число и тангенциальную скорость газозвушного потока.

4) На параметры разрежения в полости соплового блока существенное влияние оказывает угол наклона газовой струи к оси камеры смешения. Это отчётливо заметно на графике зависимости минимального статического давления от угла подачи газовой струи (рис. 10).

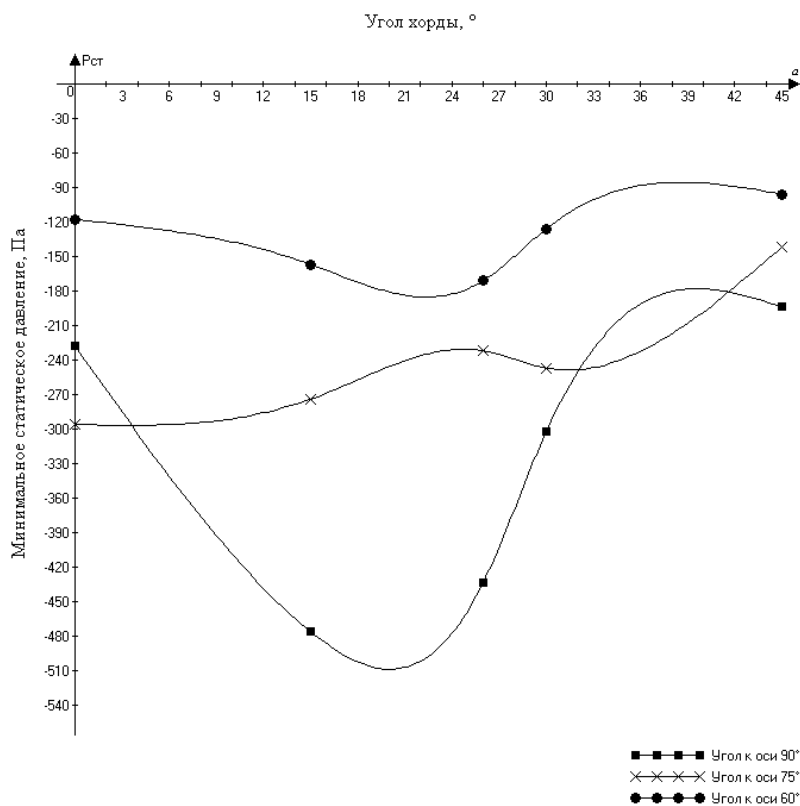


Рис. 10. Зависимость минимального статического давления от угла подачи газа Fig. 10. Dependence of the minimum static pressure on the gas supply angle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение или Выводы (Conclusions)

Проведено численное исследование газодинамических процессов взаимодействия хордальных газовых струй среднего давления с вихревым воздушным потоком при подаче воздуха осевым вентилятором. Определены зависимости равномерности распределения газа, степени крутки и разрежения от углов подачи β и α . Полученные результаты подтверждают возможность эффективного формирования закрученного потока без использования диска с закручивающими лопатками, что позволяет существенно снизить энергозатраты благодаря использованию осевых вентиляторов.

В рамках данной работы приоритетным является достижение наиболее равномерного распределения газа по каждому из сечений соплового блока. Однако следует также учесть компромисс между другими параметрами. При таких условиях наиболее подходящей является конфигурация углов $\beta=90^\circ/\alpha=26^\circ$. В этом случае достигается достаточно низкий коэффициент вариации (13,02%), высокая степень разрежения (-433,02 Па), распределенная на большей площади по сравнению с углом

хорды 15° , а также высокая тангенциальная скорость в выходном сечении (8,54 м/с).

Выбор угла подачи хордальных струй может варьироваться в зависимости от приоритетных задач. Так, для достижения наибольшего разрежения в небольшой зоне вблизи оси соплового блока в может быть использована конфигурация углов $\beta=90^\circ/\alpha=15^\circ$, для достижения наибольшей тангенциальной скорости – $\beta=90^\circ/\alpha=30^\circ$. При необходимости достижения протяженной зоны разрежения подходит конфигурация $\beta=75^\circ/\alpha=15^\circ$.

При подаче газа под углом $\beta=60^\circ$ низкий коэффициент вариации обеспечивается только при углах хорды $0^\circ \div 15^\circ$, однако в этом случае минимальны величины разрежения (-118,1 ÷ -157,1 Па) и тангенциальной скорости в выходном сечении (5,81 ÷ 7,32 м/с).

Литература

1. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Сунгатуллин Р.Г., др. Образование и способы снижения оксидов азота в котлах тг-104 с прямоточно-вихревыми горелками и периферийной подачей газа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016. №9-10. С. 83-90.
2. Евдокимов О.А. Научные основы организации горения в массивах противоточных и комбинированных закрученных струй: Дис. ... д-ра. техн. наук. Рыбинск; 2022. Доступно по: <https://www.dissercat.com/content/nauchnye-osnovy-organizatsii-goreniya-v-massivakh-protivotochnykh-i-kombinirovannykh-zakruch>. Ссылка активна на 11 октября 2025.
3. Леонтьев А.И., Кузма-Кичта Ю. А., Веретенников С. В., др. Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках // Теплофизика высоких температур. 2021. №5(59). С. 774-789.
4. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Электроприводы переменного тока. М.: Мир, 1987. 588 с.
5. Danyang W., Dongxin H., Jianguo X., et al. Influences of Dual Air-Swirl Angles on Swirling Injection and Combustion of Kerosene-Air at a Supercritical Pressure // Aerospace Research Communications. 2025. Vol. 3.
6. Bekhradinasab A., Vakilipour S., Al-Zaili J. Influence of swirl number and air preheating on turbulent mixing in hydrogen-methane blends within a swirl-stabilized burner // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2025. Vol. 239.
7. Меламед Л.Э., Филиппов Г.А. Моделирование турбулентности как «вихревой засыпки» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. №9-10(19). С. 122-132.
8. Soroush S. Properties of turbulent non-premixed methane/air flames in a miniature-scale swirl burner under different coaxial airflow swirl numbers // Future Energy. 2022. Vol. 2. pp. 27-37.
9. Xiangyun L., Zhu L., Liangde L., et al. Combustion characteristics of dual swirl low nitrogen burners in small gas boilers // Thermal Science. 2025. p. 152.
10. Sun M., Yali S., Yu G., et al. Numerical Investigation of Flow and Flame Structures in an Industrial Swirling Inverse Diffusion Methane/Air Burner // Fire. 2024. Vol. 7. p. 237.
11. Павлов Г.И., Теляшов Д.А., Шайхутдинов Я.О. Сопловой блок блочной горелки с хордальными газовыми струями // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: Сб. тезисов докладов XII Всерос. конф. с междунар. участием; 11-14 ноября 2024 г., Новосибирск: ИТ СО РАН, 2024. С. 76.
12. Вафин Д.Б. Тепловые и аэродинамические параметры камеры радиации печи пиролиза углеводородов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. №3(24). С. 198-210.
13. John G., Ephraim S., John A., et al. Evaluation of the efficacy of turbulence models for swirling flows and the effect of turbulence intensity on heat transfer // Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals. 2016. Vol. 70. №6. pp. 485–502.
14. Шайхутдинов Я.О., Павлов Г.И., Накоряков П.В., и др. Исследование хордальных струй в реагирующих смесях численным методом // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды — 2025»; 29 сентября — 3 октября 2025 г., Казань: Казанский ун-т, 2025. С. 635-640.
15. Павлов Г.И. Инжекционный смеситель горелки. Патент РФ на полезную модель №192541. 23.09.2019. Бюл. №27. Доступно по: <https://patents.google.com/patent/RU192541U1>. Ссылка активна на 11 октября 2025.

Авторы публикации

Шайхутдинов Ярослав Олегович – аспирант кафедры «Специальных технологий в образовании» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, Россия. jara2105@mail.ru

Павлов Григорий Иванович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Специальных

технологий в образовании» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-0825-0875>

Халиулин Руслан Рафаэлевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Реактивных двигателей и энергетических установок» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-2285-988X>

Теляшов Дмитрий Александрович – учебный мастер кафедры «Специальных технологий в образовании» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, Россия.

Тихонов Олег Александрович – ст. преподаватель кафедры «Реактивных двигателей и энергетических установок» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, Россия.

References

1. Taumarov MA, Akhmetova RV, Sungatullin RG, et al. Education and ways of reducing nitrogen oxides in the boiler tg-104 with a direct-flow-vortex burners and the peripheral gas supply. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016; (9-10):83-90. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-9-10-83-90>.
2. Evdokimov OA. *Nauchnye osnovy organizatsii goreniya v massivakh protivotochnykh i kombinirovannykh zakruchennykh strui* [dissertation]. Rybinsk; 2022. Available at: <https://www.dissercat.com/content/nauchnye-osnovy-organizatsii-goreniya-v-massivakh-protivotochnykh-i-kombinirovannykh-zakruch>. Accessed: 11 Oct. 2025. (In Russ).
3. Leont'ev AI, Kuzma-Kichta YA, Veretennikov SV, et al. Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2021; 59(5):774-789. (In Russ).
4. Gupta A, Lilli D, Saired N. *Elektroprivody peremennogo toka*. Moscow: Mir; 1987. (In Russ).
5. Danyang W, Dongxin H, Jianguo X, et al. Influences of Dual Air-Swirl Angles on Swirling Injection and Combustion of Kerosene-Air at a Supercritical Pressure. *Aerospace Research Communications*. 2025; 3. doi: 10.3389/arc.2025.14110.
6. Bekhradinasab A, Vakilipour S, Al-Zaili J. Influence of swirl number and air preheating on turbulent mixing in hydrogen–methane blends within a swirl-stabilized burner. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2025; 239. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126475.
7. Melamed LE, Filippov GA. Simulation of turbulence as a «vortex backfill». *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017; 19(9-10):122-132. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-122-132>.
8. Soroush S. Properties of turbulent non-premixed methane/air flames in a miniature-scale swirl burner under different coaxial airflow swirl numbers. *Future Energy*. 2022; 2: 27-37. doi: 10.55670/fpl.fuen.2.1.5.
9. Xiangyun L, Zhu L, Liangde L, et al. Combustion characteristics of dual swirl low nitrogen burners in small gas boilers. *Thermal Science*. 2025; 0: 152. doi: 10.2298/TSCI250326152L.
10. Sun M, Yali S, Yu G, et al. Numerical Investigation of Flow and Flame Structures in an Industrial Swirling Inverse Diffusion Methane/Air Burner. *Fire*. 2024; 7: 237. doi: 10.3390/fire7070237.
11. Pavlov GI, Telyashov DA, Shaikhutdinov YO. Soplovoi blok blochnoi gorelki s khordal'nymi gazovymi struyami. In: Pavlov GI, Telyashov DA, Shaikhutdinov YO. *Gorenie topliva: teoriya, eksperiment, prilozheniya: Sb. tezisev dokladov XII Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem; 11-14 Nov 2024; Novosibirsk, Russia*. Novosibirsk: IT SO RAN Publ., 2024. p. 76. (In Russ).
12. Vafin DB. Thermal and aerodynamic parameters radiation chambers of the hydrocarbon pyrolysis furnace. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(3):198-210. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-198-210>.
13. John G, Ephraim S, John A, et al. Evaluation of the efficacy of turbulence models for swirling flows and the effect of turbulence intensity on heat transfer. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*. 2016; 70(6): 485–502. doi: 10.1080/10407790.2016.1244390.
14. Shaikhutdinov YO, Pavlov GI. Issledovanie khordal'nykh strui v reagiruyushchikh smesyakh chislennym metodom. In: Nakoryakov PV, Telyashov DA, et al. *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual'nye problemy mekhaniki sploshnoi sredy — 2025»*; 29 Sept — 3 Oct 2025; Kazan, Russia. Kazan: Kazanskii un-t Publ., 2025. pp. 635-640. (In Russ).
15. Pavlov GI. *Inzhektionsionnyi smesitel' gorelki*. Patent RUS №192541. 23.09.2019. Byul. №27. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU192541U1>. Accessed: 11 Oct 2025. (In Russ).

Authors of the publication

Yaroslav O. Shaikhutdinov – Kazan National Research Technical University named after

A.N. Tupolev, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0005-4296-5235>.
jara2105@mail.ru

Gregory I. Pavlov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-0825-0875>

Ruslan R. Khaliulin – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-2285-988X>

Dmitry A. Telyashov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia.

Oleg A. Tikhonov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **31.10.2025 г.**

Отредактировано **21.01.2026 г.**

Принято **02.02.2026 г.**