

Исследования структуры изотермического потока внутри канала с завихрителем

¹ДОСТИЯРОВ Абай Мухамедиярұлы, д.т.н., профессор, dost51@mail.ru,

^{1*}САДЫКОВА Самал Бекболатовна, докторант, kundyzdy@mail.ru,

¹Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева, Казахстан, 050013, Алматы, ул. А. Байтурсынова, 126/1,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Цель работы – исследование структуры изотермического потока внутри канала с завихрителем. Приводятся результаты экспериментального исследования параметров изотермического потока воздуха внутри двух цилиндрических каналов различного диаметра с завихрительными лопатками на входе. Методика проведения эксперимента подробно описана. Получены значения интенсивности турбулентности и скорости потока в различных точках внутри канала. Результаты эксперимента представлены в графической форме. На основе анализа экспериментальных параметров приводятся факторы, влияющие на их значение. Статья может представлять интерес для исследователей и специалистов в области энергетики.

Ключевые слова: смешивание, интенсивность турбулентности, завихрительные лопатки, камера сгорания.

Введение. Экологичность и экономичность современных газотурбинных двигателей и установок в основном определяется работой их камер сгорания. Основными токсичными соединениями, которые образуются при сжигании топлива, в КС являются оксиды азота NOx. Их генерация в условиях КС протекает по механизму Зельдовича [1].

Анализ [2, 3] работ показывает, что на образование NOx влияют величины таких параметров, как температура – T , давление – P , время пребывания продуктов реакций в зоне горения – τ , концентрации реагирующих веществ – Z и их флуктуация. Многие методы подавления оксидов азота направлены на снижение температурного уровня факела. Некоторые из них недостаточно эффективны, так как при применении их повышаются продукты неполного горения CO, C_nH_m и др. (например, при повышении α в зоне горения). Это влияет не только на экологические, но и на экономические аспекты КС. Другие методы достигли предела своего совершенства и не могут обеспечить современные требования по эмиссии вредных выбросов. Комбинация известных методов: микрофакельного сжигания и сжигания «обедненной» смеси, в новых устройствах даст хорошие энергетические и экологические параметры. В таких устройствах формирование «обедненной» топливо-воздушной смеси (ТВС) зависит от структуры потока [7].

Сложностью физико-химических процессов,

протекающих в камерах сгорания ГТД, является необходимость учета специфики турбулентных течений, многофазности и многокомпонентности среды, тепло- и массообмена, радиационного переноса и т.д. Все это не позволяет строить строгие модели по структуре потока в топливосжигающих устройствах и требует экспериментальных исследований в изотермических условиях потока.

К основным параметрам, характеризующим поток, относятся интенсивность турбулентности и скорость потока. В любой фиксированной точке турбулентного потока течение имеет скорость $u = \bar{u} + u'$ из двух составляющих: \bar{u} – средняя, постоянная по времени, и u' – отклонение от средней скорости \bar{u} , которая называется пульсацией. Отношение среднеквадратичной пульсационной скорости к средней скорости течения, выражаемое обычно в %, называется интенсивностью турбулентности:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} \times 100\%. \quad (1)$$

Методика. В данной статье приводятся результаты экспериментального исследования параметров изотермического потока воздуха внутри двух цилиндрических каналов различного диаметра с завихрительными лопатками на входе. Рассматриваемые параметры потока: интенсивность турбулентности и скорость. Общая конструкция исследуемых цилиндрических каналов (толщиной $\delta = 2$ мм) приведена на рисунке 1, которая со-

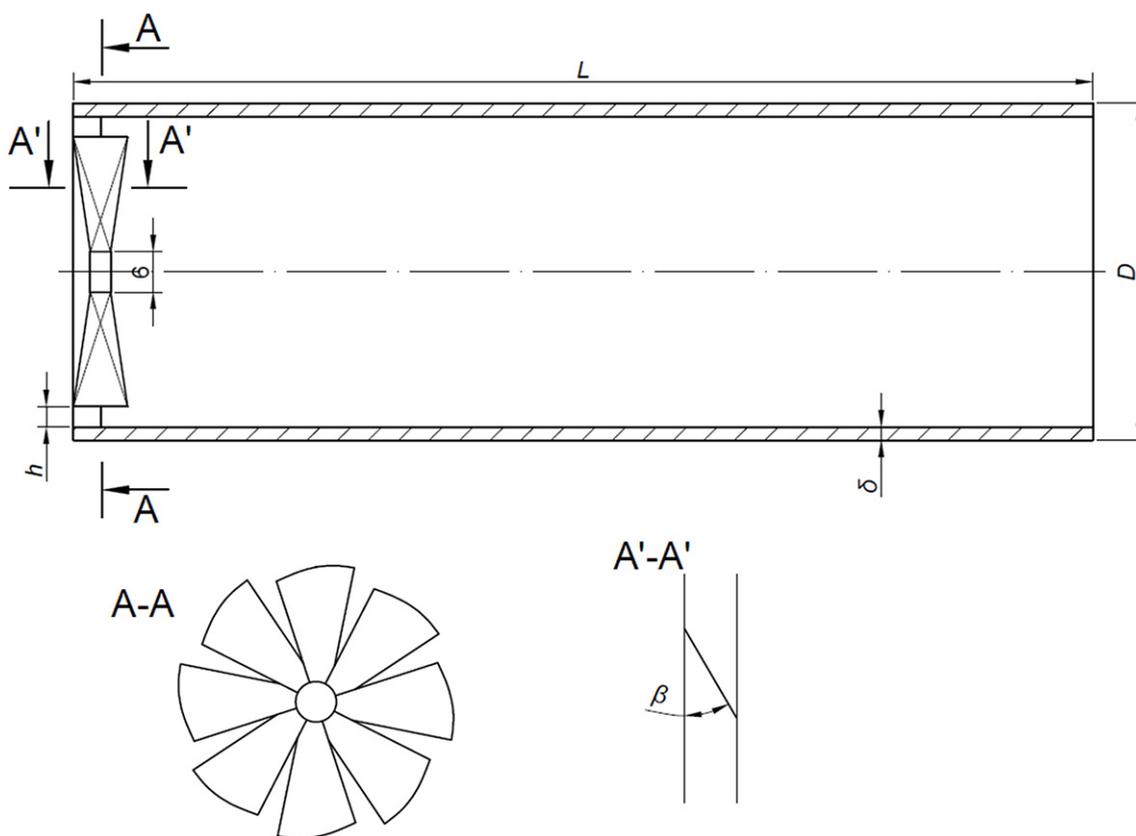


Рисунок 1 – Канал с входным завихрителем

стоит из цилиндрического корпуса с внутренним диаметром $D=46$ мм и длиной $L=150$ мм первый, а второй – $D=71$ мм и длиной $L=250$ мм. Цилиндрические каналы на входе имеют завихритель с восемью лопатками с одинаковыми углами поворота $\beta=30^\circ$. Лопатки обведены кольцевым ободком шириной (высотой) $h=3$ мм.

Такой канал используются в качестве воздушной форсунки для подготовки топливно-воздушных смесей во фронтальных устройствах КС, поэтому структура потока в них имеет практическую ценность при проектировании аналогичных устройств.

Эксперимент проводился на стенде, схема которого приведена на рисунке 2, состоящем из вентилятора, для подачи воздуха; аэродинамической трубы, на выходе которой установлены исследуемые образцы с тарировочной трубой (сопло Виташинского) и термоанемометра постоянной температуры. Чувствительный элемент термоанемометра – датчик из вольфрамовой нити.

В начале эксперимента проводилась тарировка [6] термоанемометра при различных скоростях потока на выходе из сопла Виташинского перед исследуемыми образцами. Для этого в центре сопла устанавливалась трубка Пито, по значению которой при различной производительности вентилятора определялась зависимость $E=f(u)$.

По показаниям термоанемометра в исследуемых точках интенсивность турбулентности рассчитывалась из выражения [4,5]

$$\epsilon = \frac{4\bar{E}(\bar{e} - e_0)}{\bar{E}^2 - \bar{E}_0^2} \times 100\%,$$

где, \bar{E}_0 – напряжение моста при отсутствии потока в трубе, В;

\bar{E} – постоянная составляющая напряжения моста при потоке в трубе, В;

\bar{e} – пульсационная составляющая напряжения моста при потоке в трубе, В;

e_0 – системная погрешность, В.

Средняя скорость потока \bar{u} выбранных точек внутри канала определялась на основе функции $E=f(u)$ по выражению

$$\bar{u} = \left(\frac{\bar{E} - A}{B} \right)^2,$$

где A, B – коэффициенты тарировочной зависимости, которые определяются из графика $E=f(u)$ [4,5].

Результаты исследований. Обработка экспериментальных данных показывает, что по поперечному сечению в обоих каналах скорость потока имеет схожий градиент, т.е. скорость потока воздуха внутри канала растет от центра к периферии (к стенке). Такая форма изменений графика скорости связана с тем, что входной завихритель закручивает поток воздуха, повышая тангенциальную составляющую скорости, и из-за центробежных сил потока концентрируется на периферии канала, тем самым создав в центре цилиндрического канала зону пониженного давления и низкой скорости.

Из рисунка 3 видно, что внутри канала с $D=46$ мм скорость потока в центре на расстоянии до 2-го калибра составляет в среднем 0,3 м/с, а на периферии доходит до 13 м/с. В калибрах 2,5 и 2,82 – в центре 1 м/с, а около стенок 9 м/с, т.е. к выходу из канала скорость потока стремится к уравниванию по сечению. При $D=71$ мм наблюдается схожая картина (рисунок 5), но из-за того что диаметр канала больше, завихрительные лопатки создают меньшее аэродинамическое сопротивление, поэтому скорость потока выше, чем при

$D=46$ мм. Из рисунка 5 видно, что в центре скорость по калибрам увеличивается от 0,3 до 1,3 м/с, а ближе к стенке снижается от 18 до 13 м/с.

Исследование интенсивности турбулентности (ϵ) показывает, что его максимальное значение имеет место в центре канала при $D=46$ мм и вблизи к стенке при $D=71$ мм. Достижение таких значений в этих точках обусловлено разными причинами.

Большое значение в центре канала (в районе оси) достигается тем, что, как выше было отмечено,

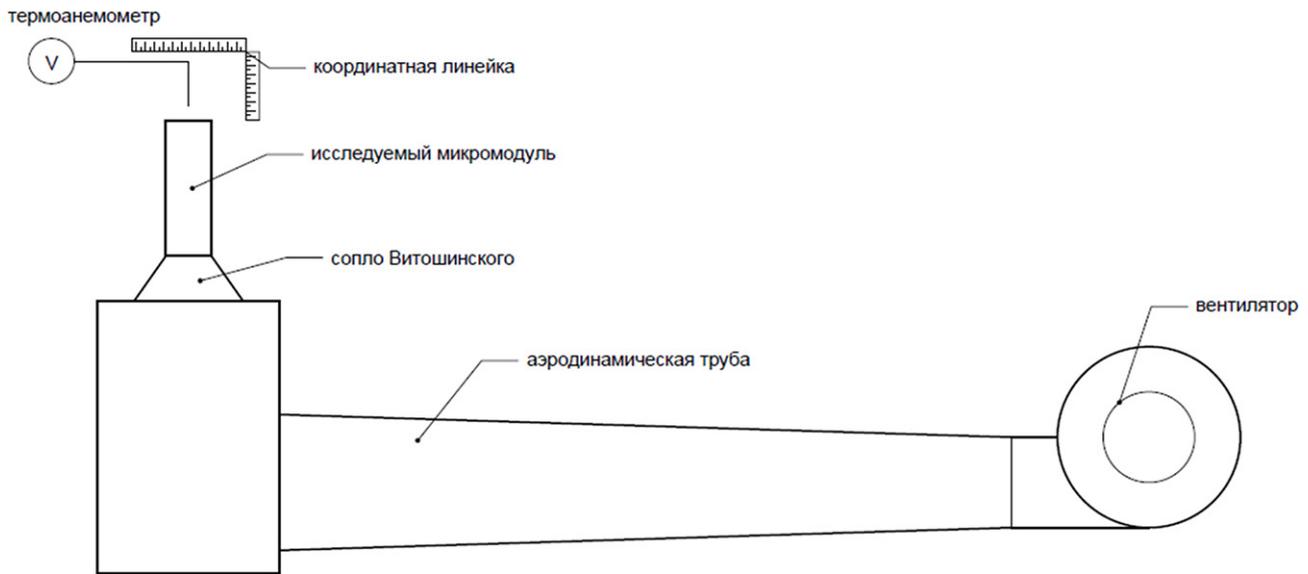


Рисунок 2 – Схема экспериментального стенда

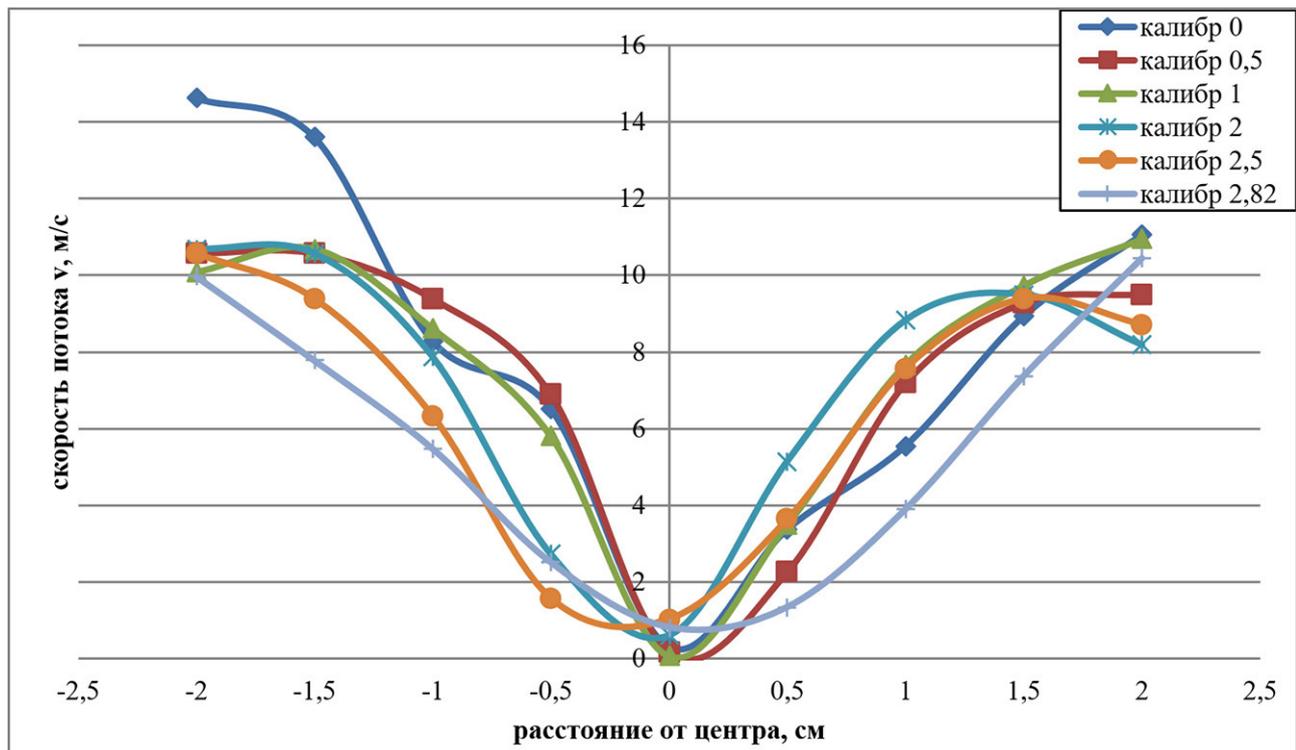


Рисунок 3 – Скорость потока внутри канала $D_{вн} = 46$ мм

из-за периферийного движения закрученного потока и в центре канала образуется зона с пониженной средней скоростью. Как видно из выражения (1), интенсивность характеризуется пульсацией средней скорости, и поэтому набегающие потоки

от центра к стенке и наоборот в центре создают высокие пульсации. К тому же зависимость интенсивности турбулентности обратна пропорциональна средней скорости движения. В итоге слой, который на периферии имеет высокую среднюю

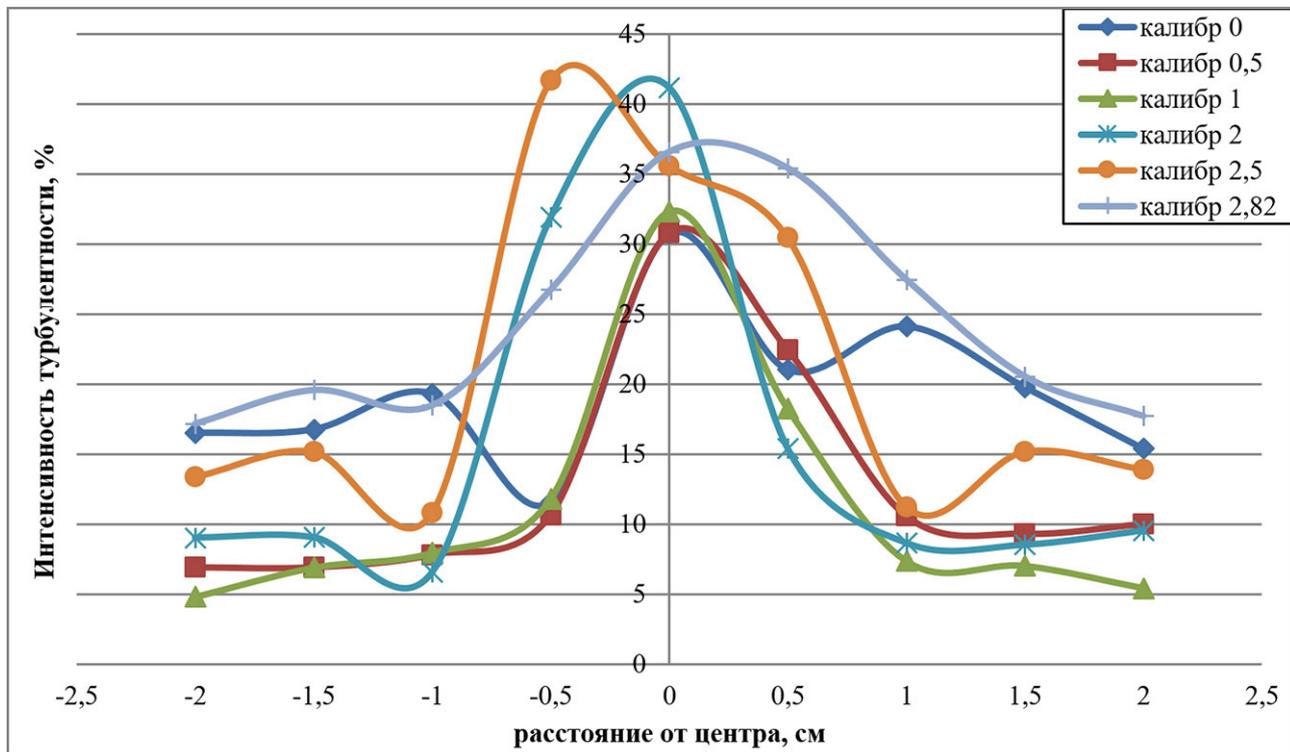


Рисунок 4 – Интенсивность турбулентности внутри канала $D_{вн} = 46$ мм

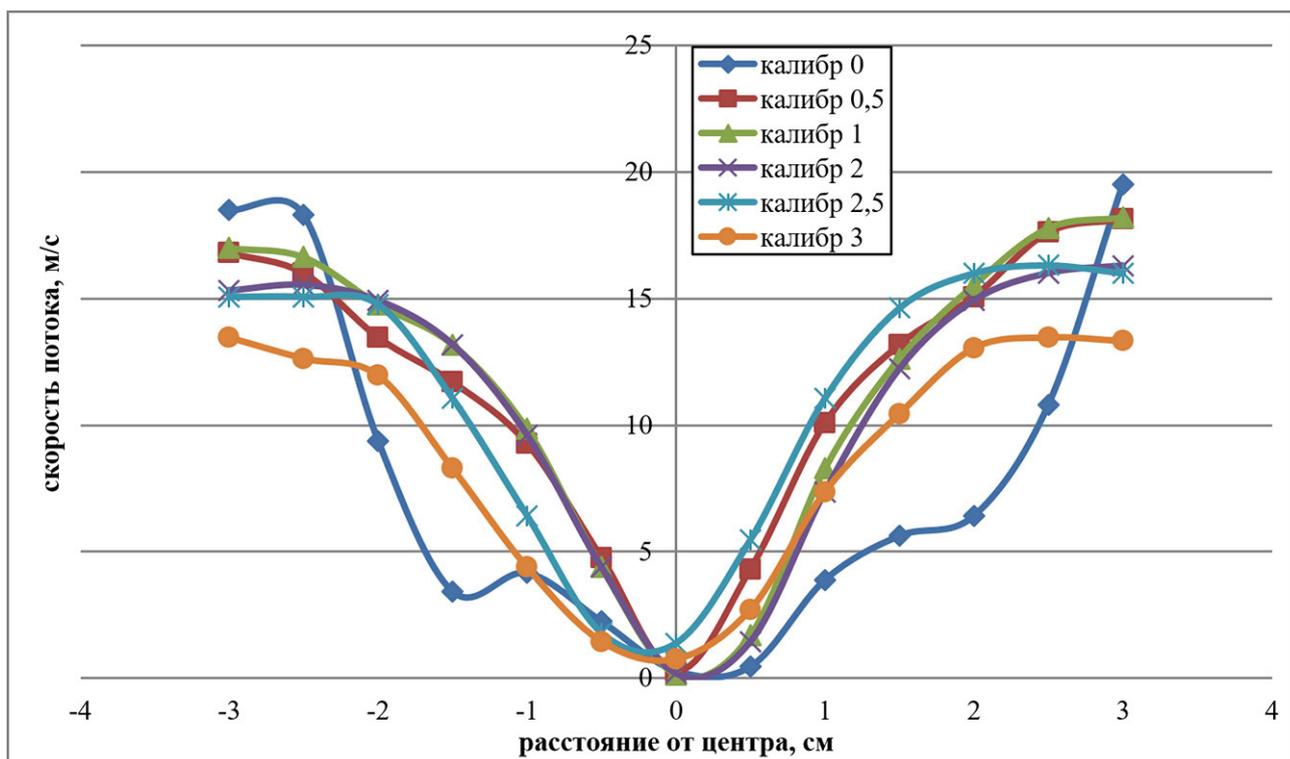


Рисунок 5 – Скорость потока внутри канала $D_{вн} = 71$ мм

скорость, обладает более низкой интенсивностью турбулентности по сравнению с центром.

Однако при $D=71$ мм на периферии ближе к стенке замечается высокое значение ϵ , это связано с «пристеночной» турбулентностью. При течении потока на поверхности твёрдой стенки появляется пограничный слой, в котором из-за трений образуются мелкие вихри и пульсации скорости потока, что приводит к росту интенсивности турбулентности. Это явление называется «пристеночной» турбулентностью.

Из кривых ϵ (рисунок 4) видно, что интенсивность турбулентности увеличивается от входа к выходу канала, по оси от 30 до 36%, а по периферии от 5 до 17%. В калибре 0 у стенки большое значение ϵ 15-16% связано с тем, что ободок, обведенный вокруг лопаток, создает пульсацию скорости.

Результаты замеров ϵ в канале $D=71$ мм (рисунок 6) показывают: интенсивность турбулентности от центра к стенкам канала до $r=10$ мм снижается, затем от $r=15$ мм до стенки растет. Здесь тоже наблюдается влияние кольцевого ободка на ϵ в нулевом калибре. Во всех калибрах значение ϵ варьирует: в центре канала от 29 до 36%, на расстоянии $r=10-20$ мм от 9 до 20%, у стенки от 23 до 60%. При $D=71$ мм более развитая «пристеночная» турбулентность (чем при $D=46$ мм) связана со следующими факторами: из-за большего диа-

метра (большая площадь поверхности соприкасаемая с потоком); из-за длины канала (большой путь действующий на поток); из-за высокой скорости, которая создает значительное возмущение потока вдоль стены.

Выводы. Отсюда можно сделать следующие выводы:

1) На интенсивность турбулентности потока внутри канала кроме входного завихрителя также влияют длина и диаметр канала. Но подбор оптимальных размеров канала должен проводиться с учетом скорости потока, так как «пристеночная» турбулентность тоже зависит от скорости потока.

2) Каналы с входным завихрителем используются во фронтальных устройствах КС для создания ТВС. Поэтому при проектировании таких устройств, для обеспечения эффективного смешивания, необходимо ориентироваться на экспериментальные данные по исследованию структуры потока, т.е. скоростного поля и интенсивности турбулентности внутри канала.

3) Исследование структуры течения воздуха в каналах дает нам возможность определить зоны впрыска (подачи) топлива.

4) Результаты данной работы могут быть научной основой для исследований при проектировании или создании эффективных микромодульных форсунок.

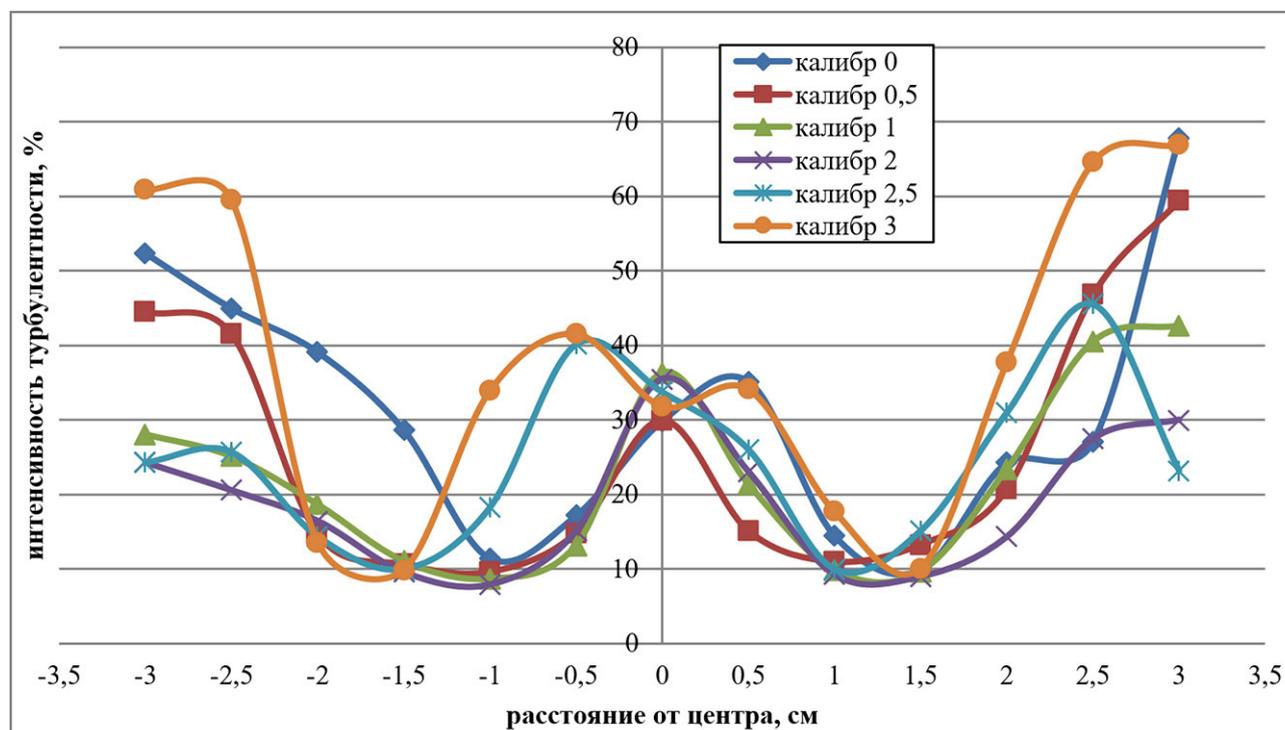


Рисунок 6 – Интенсивность турбулентности внутри канала $D_{вн} = 71$ мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anetor L., Odetunde Ch., Osakue E.E. Computational analysis of the extended Zeldovich mechanism // Arabian Journal for Science and Engineering. 39, 2014. – P. 8287-8305.

2. Достияров А.М., Умышев Д.Р., Туманов М.Е. Классификация методов подавления NOx и возможности их уменьшения за счет улучшения смесеобразования топливовоздушной смеси // Вестник Казахского нац. техн. ун-та им. К.И. Сатпаева (КазНТУ). 2015. № 3. С. 85-92.
3. Konnov A.A., Javed M.T., Kassman H., Irfan N. NOx formation, control and reduction techniques // Handbook of Combustion. V.2: Combustion Diagnostics and Pollutants. – Wiley, 2010. – P. 439-464.
4. Bernard P.S., Wallace J.M. Turbulent flow: analysis, measurement and prediction. Wiley, 2002, – 497 p.
5. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – Минск: Эколит, 2011. – 720 с.
6. Исатаев С.И., Аскарова А.С., Болегенова С.А. и др. Специальный физический практикум по физической гидро- и аэродинамике: Учебное пособие. – Алматы: КазНУ им. Аль-Фараби, 2015. – 226 с.
7. Достияров А.М., Достиярова А.М., Садыкова С.Б., Картджанов Н.Р. Микромодульные воздушные форсунки для кольцевой камеры сгорания ГТД // Вестник КазНУ. 2019. № 6. С. 451-456.

Құйындатқышы бар канал ішіндегі изотермиялық ағын құрылымын зерттеу

¹ДОСТИЯРОВ Абай Мухамедиярұлы, т.ғ.д., профессор, dost51@mail.ru,

^{1*}САДЫКОВА Самал Бекболатовна, докторант, kundyzdy@mail.ru,

¹Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан, 050013, Алматы, А. Байтұрсынұлы көш., 126/1,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жұмыстың мақсаты – құйындатқышы бар канал ішіндегі изотермиялық ағын құрылымын зерттеу. Әртүрлі диаметрдегі екі цилиндрлік каналдың ішіндегі ауаның изотермиялық ағынының параметрлерін эксперименттік зерттеу нәтижелері кіреберісте құйындатқыш қалақтармен келтірілген. Эксперименттің әдістемесі егжей-тегжейлі сипатталған. Арна ішіндегі әртүрлі нүктелердегі турбуленттілік қарқындылығы мен ағынның жылдамдығы алынған. Эксперимент нәтижелері графикалық түрде ұсынылған. Эксперименттік параметрлерді талдау негізінде олардың мәніне әсер ететін факторлар келтірілген. Мақала энергетика саласындағы зерттеушілер мен мамандар үшін қызықты болуы мүмкін.

Кілт сөздер: араластыру, турбуленттілік қарқындылығы, құйындатқыш қалақтар, жану камерасы.

Studying the Structure of an Isothermal Flow inside a Channel with a Swirler

¹DOSTIYAROV Abay, Dr. Tech. Sci., Professor, dost51@mail.ru,

^{1*}SADYKOVA Samal, doctoral student, kundyzdy@mail.ru,

¹Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Kazakhstan, 050013, Almaty, A. Baitursynova str., 126/1,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of the work is studying the structure of an isothermal flow inside a channel with a swirler. The results of an experimental study of the parameters of an isothermal air flow inside two cylindrical channels of different diameters with vortex blades at the inlet are presented. The experimental procedure is described in detail. The values of turbulence intensity and flow velocity at various points inside the channel are obtained. The results of the experiment are presented in graphical form. Based on the analysis of the experimental parameters, the factors influencing their value are presented. The article can be of interest to researchers and specialists in the field of energy.

Keywords: mixing, turbulence intensity, swirl blades, combustion chamber.

REFERENCES

1. Anetor L., Odetunde Ch., Osakue E.E. Computational analysis of the extended Zeldovich mechanism // Arabian Journal for Science and Engineering. 39, 2014. – P. 8287-8305.
2. Dostiyarov A.M., Umyshev D.R., Tumanov M.E. Klassifikatsiya metodov podavleniya NOx i vozmozhnosti ikh umensheniya za schet uluchsheniya smeseobrazovaniya toplivovozdushnoi smesi // Vestnik Kazakhskogo nats. tekhn. un-ta im. K.I. Satpaeva (KazNTU). 2015. № 3. S. 85-92.
3. Konnov A.A., Javed M.T., Kassman H., Irfan N. NOx formation, control and reduction techniques // Handbook of Combustion. V.2: Combustion Diagnostics and Pollutants. – Wiley, 2010. – P. 439-464.
4. Bernard P.S., Wallace J.M. Turbulent flow: analysis, measurement and prediction. Wiley, 2002, – 497 p.
5. Abramovich G.N. Teoriya turbulentnykh strui. – Minsk: Ekolite, 2011. – 720 s.
6. Isataev S.I., Askarova A.S., Bolegenova S.A. i dr. Spetsialnyi fizicheskii praktikum po fizicheskoi gidro- i aerodinamike: Uchebnoe posobie. – Almaty: KazNU im. Al-Farabi, 2015. – 226 s.
7. Dostiyarov A.M., Dostiyarova A.M., Sadykova S.B., Kartdzhyanov N.R. Mikromodulnye vozdushnye forsunki dlya koltsevoi kamery sgoraniya GTD // Vestnik KazNITU. 2019. № 6. S. 451-456.