

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВСТРЕЧНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ

Дорж Д., Худяков П.Ю., Берг И.А., Жилкин Б.П.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), lumen_xp@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы исследования механизмов соударения газовых струй. Для идентификации структуры течения используется информация о мгновенном поле значений характерной величины - температуры. Рассматривались прямоточные и закрученные с помощью аксиального завихрителя струи. Выявлены и описаны различные режимы термомеханического взаимодействия. Установлены критерии существования этих режимов. Выявлено, что для прямоточных струй существует два основных режима термомеханического взаимодействия: для первого режима характерно образование единой монозоны взаимодействия, второй режим взаимодействия отличается дискретной областью соударения струй, что указывает на возникновение целой системы вихрей. Также были проведены эксперименты для соударяющихся струй с разными круткой и скоростью. Было установлено, что при неодинаковой интенсивности крутки соударяющихся струй дискретно зона взаимодействия приобретает выраженную асимметрию.

Ключевые слова: газовая струя, завихритель, соударение струй, структурное образование, тепловизор.

SPECIAL FEATURES OF THERMAL-MECHANICAL INTERACTION BETWEEN GAS COUNTERJETS

Dorzh D., Khudyakov P.Y., Berg I.A., Zhilkin B.P.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», Ekaterinburg, Russia (620002, 19 Mira street, Ekaterinburg), lumen_xp@mail.ru

This paper discusses issues related to investigation of gas jets collision. In order to identify the structure of the flow data on instant field of temperature, which is characteristic variable is used. The paper presents results of experimental studies of the flow structure at collision of coaxial gas jets. Direct flowing jets and those swirled using axial swirler were investigated. Various modes of thermal-mechanical interaction have been identified and discussed; the criteria for occurrence of these modes have been determined. It was found that for direct flow jets two primary modes of thermal-mechanical interaction exist with a single monozone formation being a characteristic feature of the first mode, while the second mode is marked by discrete zone of jets collision, which indicates emergence of a system of vortexes. Besides, experiments were run for colliding jets with different swirls and velocities. It was found that with different swirl rate of the colliding jets the discrete interaction zone manifests asymmetry.

Keywords: gas jet, swirler, jets collide, structural formation, thermal imager.

1. Введение

Соударяющиеся газовые струи широко применяются в различных промышленных технологиях, что обусловлено концентрацией энергии и высокой турбулизацией течения в зоне соударения. При изучении таких систем большинство авторов уделяет основное внимание итоговому, результирующему течению, и лишь в отдельных работах рассматриваются вопросы формирования первичной области взаимодействия, хотя именно из неё вытекает результирующий поток. Структура течения в этой области практически не изучена, не раскрыт механизм соударения струй.

Для идентификации структуры течения необходима информация о мгновенном поле значений характерных величин. Такую информацию о поле температуры можно получить, используя метод термовизуализирующей сетки [2; 3; 5].

2. Описание экспериментальной установки

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки.

Скорости истечения воздуха из струйных аппаратов w регулировались изменением частоты вращения воздуходувки путем вариации напряжения, подаваемого на её электродвигатель, и вычислялись по объемному расходу воздуха, определяемому с помощью ротаметра (на рис. 1 не показан).

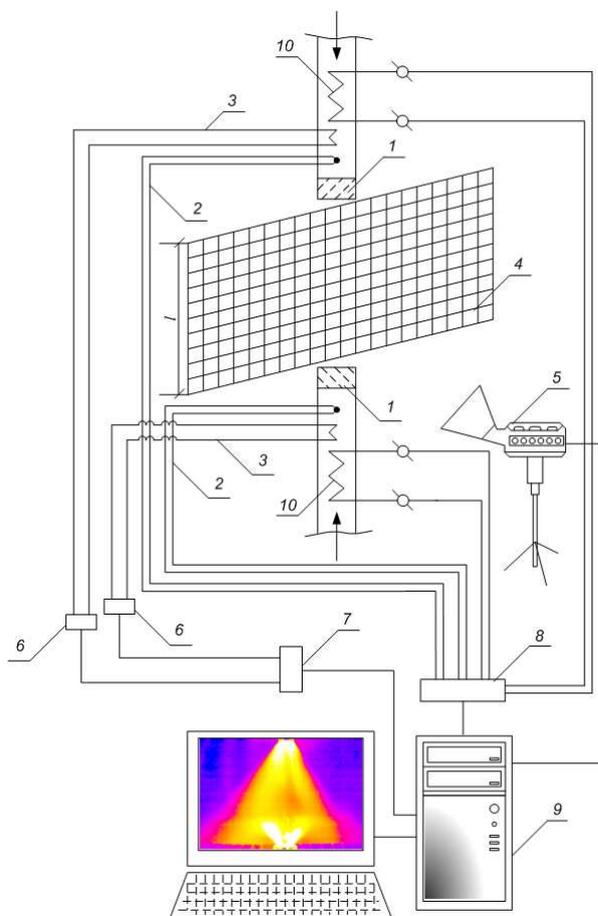


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - струйный аппарат (без завихрителя или с ним); 2 - термопара; 3 - датчик термоанемометра; 4 - термовизуализирующая сетка; 5 - тепловизор; 6 - электронный блок термоанемометра; 7 - АЦП; 8 - автоматическая система управления нагревом воздуха; 9 - вычислительная машина; 10 - электронагреватель.

В каждый воздухоподводящий канал были вмонтированы электрические нагреватели 10, управляемые системой автоматического регулирования 8, что позволяло поддерживать температуру рабочей среды перед обоими струйными аппаратами с точностью 0,1 °С. Термоанемометры 3, 6 использовались для определения интенсивности турбулентности.

3. Методика обработки тепловизионных изображений

При наступлении стационарного режима снимался тепловизионный фильм с частотой 30 кадров в секунду при помощи тепловизора типа NEC TH-9100, оптическая ось которого была перпендикулярна сетке-преобразователю. Фильм обрабатывался отрезками по 17,06 секунды, которые представляли собой трехмерный массив размерностью 320 x 240 x 512, где 320 x 240 - разрешение матрицы тепловизора, а 512 - количество кадров в отрезке фильма.

Затем осуществлялась процедура идентификации структур. При этом под структурным образованием понимался такой элемент в пространстве, где контрольный параметр (в данном случае температура) изменялся по единым стохастическим закономерностям. В качестве стохастической характеристики по результатам пилотных опытов было определено распределение стандартного отклонения (дисперсии) температуры S_t [5].

При вычислении S_t для каждой точки (пикселя) тепловизионной матрицы строился временной ряд. Затем для неё вычислялось S_t по стандартной процедуре, далее полученные значения по всем точкам сводились в итоговую таблицу размерностью 240 x 320, которая визуализировалась цветом, т.е точки с одинаковым значением S_t (точнее, лежащие в узком интервале значений S_t) окрашивались в один цвет. Таким образом получалось цветовое поле распределения S_t .

4. Режимы взаимодействия прямоточных струй

В этих экспериментах в качестве струйного аппарата использовалась труба круглого сечения диаметром $d = 16...32$ мм. Параметры струйной системы: скорость потока $w = 12...90$ м/с, температура струй $t_{cmp} = 23 \div 65$ °С, температура окружающей среды $t_{oc} = 18 \div 26$ °С, расстояние между срезами сопел $l = (10...25)d$.

Выявилось, что для прямоточных струй существует два основных режима термомеханического взаимодействия, которые различаются по структуре потока. Было установлено, что определяющим критерием для выделения режима является безразмерная разность температур Θ , определяемая как

$$\Theta = \frac{t_h - t_c}{t_h - t_{oc}}; \quad (1)$$

где t_h - температура горячей струи; t_c - температура холодной струи.

Первый режим, для которого характерно образование единой монозоны взаимодействия, наблюдается при $\Theta > 0,3$ (рис. 2б).

Второй режим взаимодействия существует при $\Theta < 0,3$ и отличается тем, что область столкновения струй дискретна. В ней существует несколько отдельных зон с максимумом S_t , что указывает на возникновение целой системы вихрей (рис. 3б).

В этом режиме образуется гетеровидная структура области соударения, состоящая из отдельных вихрей, идентифицируемых также по характерному значению стандартного отклонения, превышающему среднюю величину S_t по зоне взаимодействия. На рис. 3б эти вихри ограничены окружностью белого цвета, при этом два из них имеют четко выраженные ядра с повышенным значением S_t .

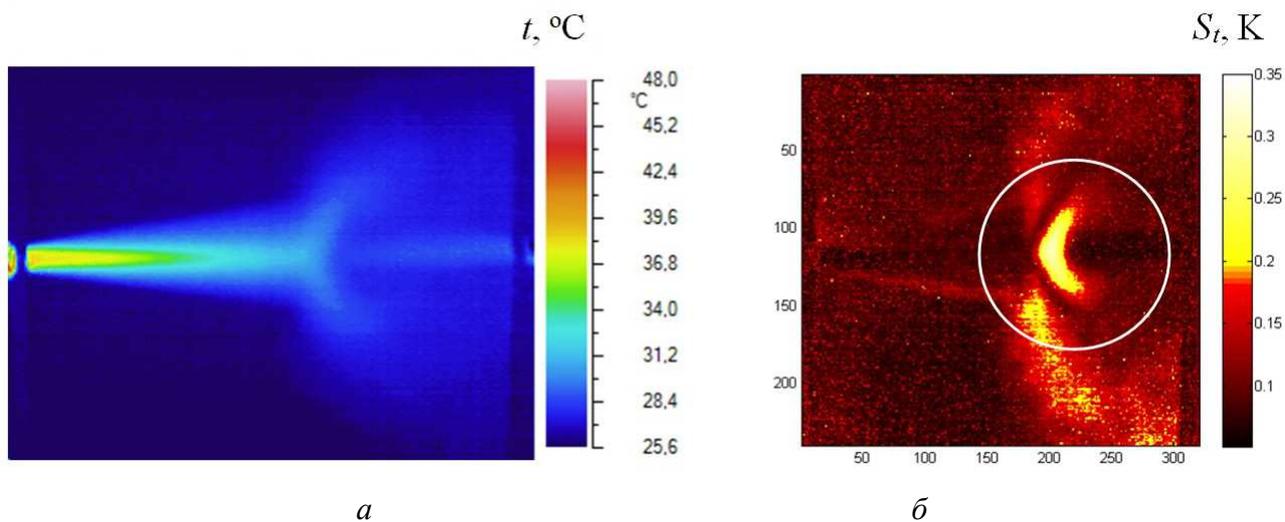


Рис. 2. Исходное (один кадр) тепловизионное изображение (а) и поле стандартного отклонения температуры S_t (б) соударяющихся прямооточных струй: скорость струи слева $w_1=40$ м/с, скорость струи справа $w_2=25$ м/с, $t_h = 60$ °С; $t_c = 31$ °С, $t_{oc} = 24$ °С, $\Theta = 0,80$, $l/d = 25$.

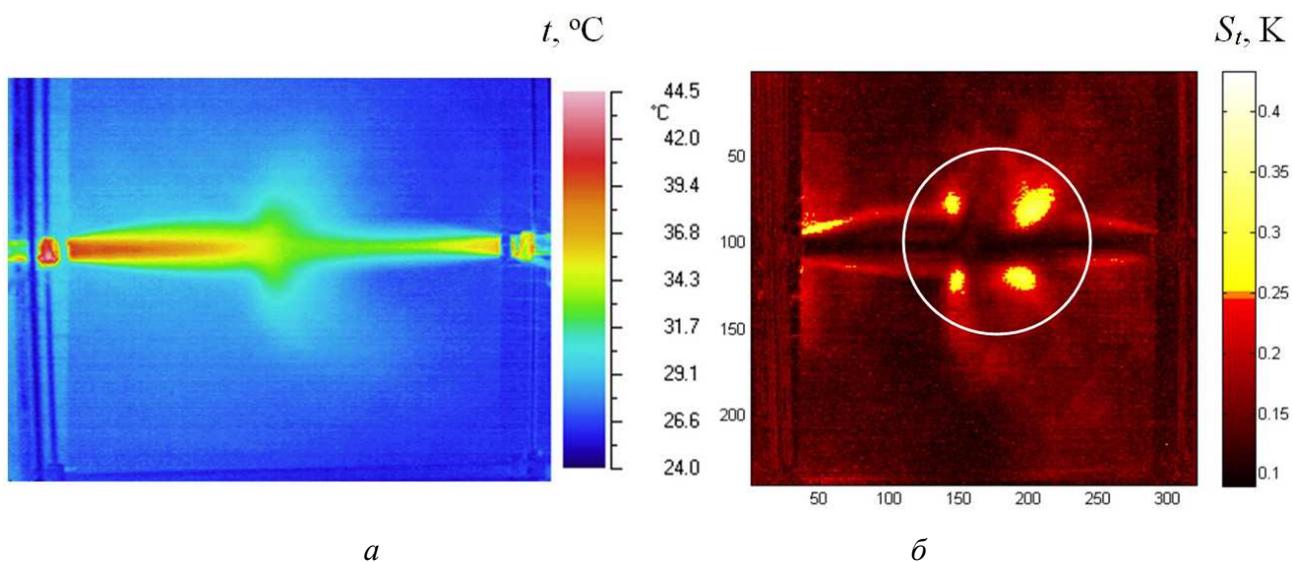


Рис. 3. Исходное (один кадр) тепловизионное изображение (а) и поле стандартного отклонения температуры S_t (б) соударяющихся прямооточных струй: $w_1 = 52$ м/с, $w_2 = 44$ м/с, $t_h = 54$ °С, $t_c = 48$ °С, $t_{oc} = 23$ °С, $\Theta = 0,19$, $l/d = 25$.

5. Режимы соударения закрученных встречных струй

Закрутка струй в противоположные стороны производилась аксиальными завихрителями с центральной втулкой диаметром 5 мм и углами установки лопаток 15°, 30° и 45°. Внешний диаметр проходного канала завихрителя изменился от 24 до 27,8 мм. Среднерасходная скорость потока по каналам варьировалась от 14,8 до 36,7 м/с.

Конструктивный параметр крутки завихрителей по Р.Б Ахмедову [1] был равен $n_A = 0,243 \dots 0,92$. Численные значения эквивалентного диаметра для завихрителей составляли $d_{экр} = 6,922 \dots 8,948$ мм.

Параметр n_A учитывает только конструктивные особенности завихрителя, причем частично: он не отражает ни количество лопаток завихрителя, ни их форму и размеры. Поэтому в качестве характеристики крутки был использован конструктивно-режимный параметр n_{CR} , предложенный в [4]:

$$n_{CR} = 1.15 Re^{0,27(n_A - 0,7)}, \quad (2)$$

где Re - число Рейнольдса ($Re = wd_s/\nu$), в котором ν - коэффициент кинематической вязкости м²/с.

5.1. Равнозакрученные струи, истекающие с равным скоростями

При столкновении закрученных струй структура течения зависит не только от разности их температур, но и от закрутки струй.

Обнаружены два основных режима термомеханического взаимодействия равнозакрученных струй, различающиеся по структуре потока.

Было установлено, что критерием режима является термомеханический параметр K_{tm} , определяемый как

$$K_{tm} = \Theta^{0,48} n_{CR} \quad . \quad (3)$$

В первом режиме ($0,52 < K_{tm} < 1,13$) образуется единая монозона взаимодействия. Тепловизионное изображение и поле стандартного отклонения температуры первого режима показаны на рис 4.

При $K_{tm} = 0,38 \div 0,52$ наблюдается переходный режим.

Сопоставление строения зоны взаимодействия при столкновении прямооточных (рис. 2) и закрученных (рис. 4) струй показывает, что при закрутке струй меняются форма этой зоны и её размер, а также положение относительно оси, проходящей через струйные

аппараты. При закрутке зона взаимодействия имеет большие размеры, вытянутую форму и отклонена относительно упомянутой оси на угол $15^\circ \dots 20^\circ$.

Во втором режиме ($K_{LM} < 0.38$) образуется дискретная зона (рис. 5б) взаимодействия. Тепловизионное изображение и поле стандартного отклонения температуры для этого режима показаны на рис. 5.

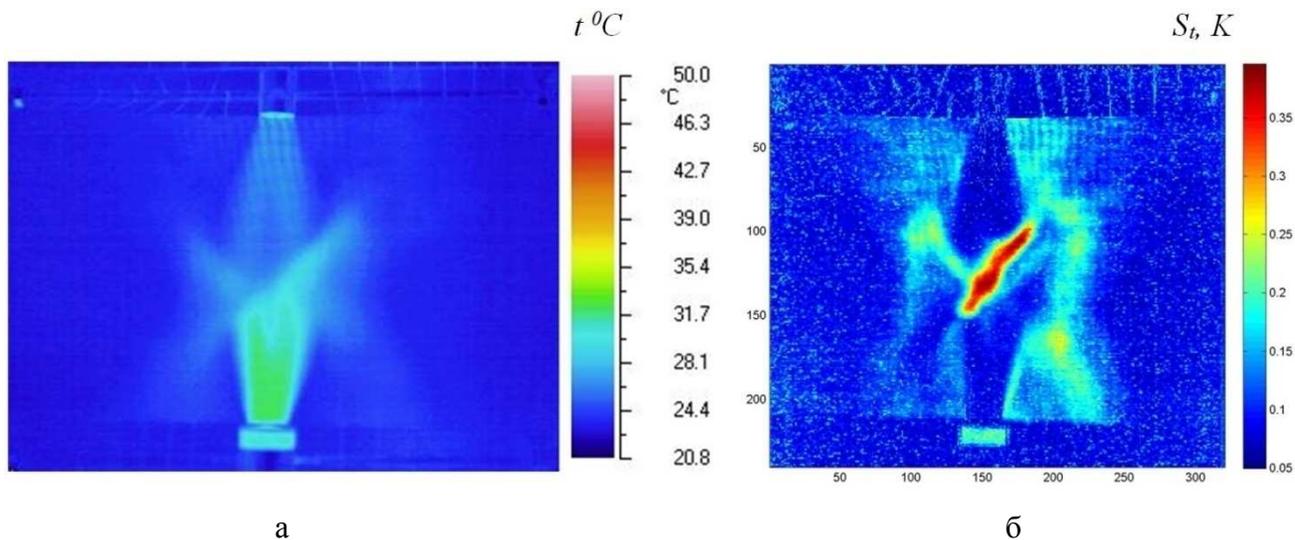


Рис. 4. Исходное (один кадр) тепловизионное изображение (а) и поле стандартного отклонения температуры S_t (б) соударяющихся противоположно закрученных струй: $w_1 = w_2 = 15$ м/с, $\gamma_1 = \gamma_2 = 15^\circ$, $t_h = 45,5$ $^\circ\text{C}$, $t_c = 31,2$ $^\circ\text{C}$, $t_{oc} = 23$ $^\circ\text{C}$, $\Theta = 0,636$; $K_{LM} = 0,874$, $l/d = 9,6$.

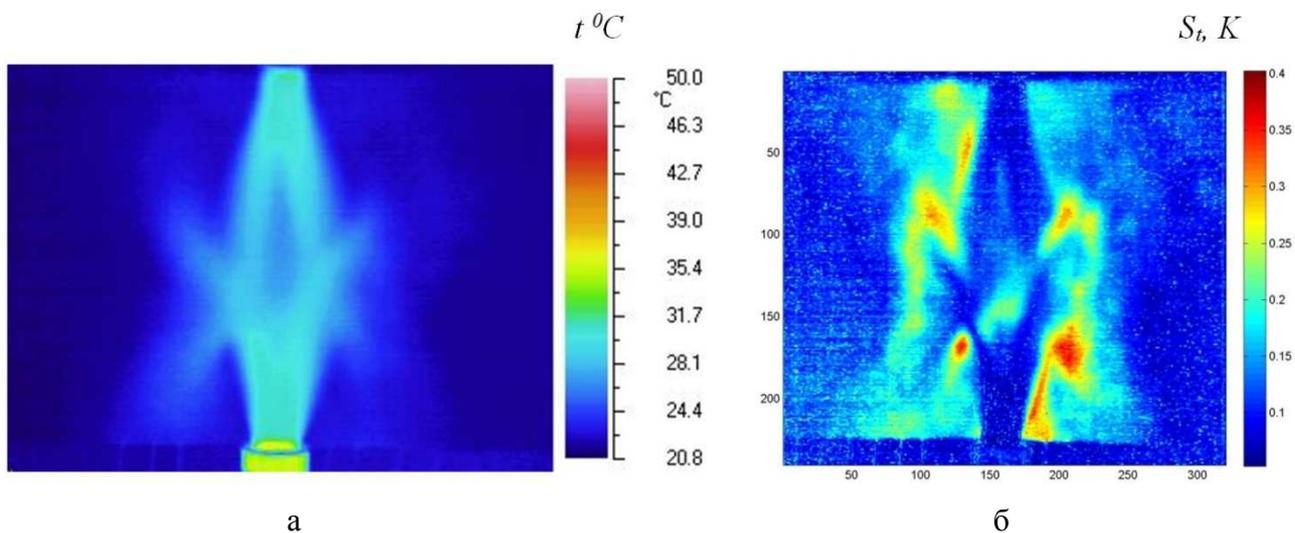


Рис. 5. Исходное (один кадр) тепловизионное изображение (а) и поле стандартного отклонения температуры S_t (б) соударяющихся закрученных струй: $w_1 = w_2 = 15$ м/с, $\gamma_1 = \gamma_2 = 15^\circ$, $t_h = 46$ $^\circ\text{C}$, $t_c = 45$ $^\circ\text{C}$, $t_{oc} = 21$ $^\circ\text{C}$, $\Theta = 0,030$, $K_{LM} = 0,17$; $l/d = 9,6$.

5.2. Столкновение струй с разными круткой и скоростью

В этом случае также наблюдаются два режима с образованием моно- или дискретной зоны взаимодействия.

В этом случае для определения режима предлагается модифицированный параметр K_{LM}^* , который определяется как

$$K_{LM}^* = \theta^{0,48}(an_{CR.B} + bn_{CR.M}), \quad (4)$$

где $n_{CR.B}$, $n_{CR.M}$ – соответственно наибольшее и наименьшее значения n_{CR} ; а, б – геометрические коэффициенты, зависящие от длины l_k межлопаточного канала завихрителя.

Для первого режима, который наблюдается при $0,52 < K_{LM}^* < 1,0$, тепловизионное изображение и поле стандартного отклонения температуры показаны на рис. 6. Особенность данного скоростного режима заключается в том, что зона взаимодействия располагается ближе к верхнему струйному аппарату (скорость истечения из него, w_2 , меньше).

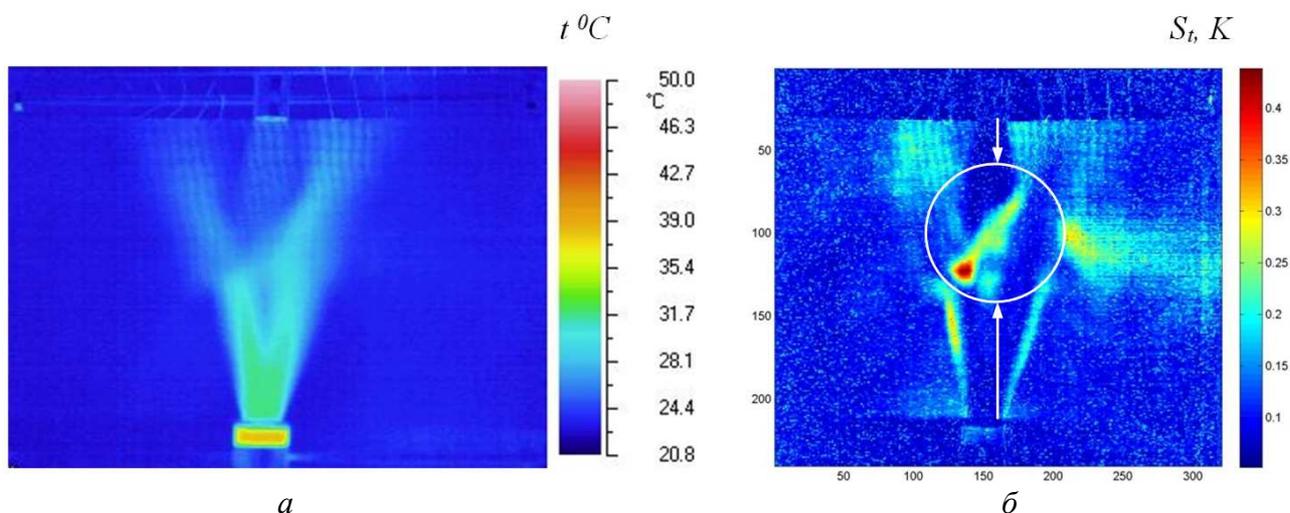
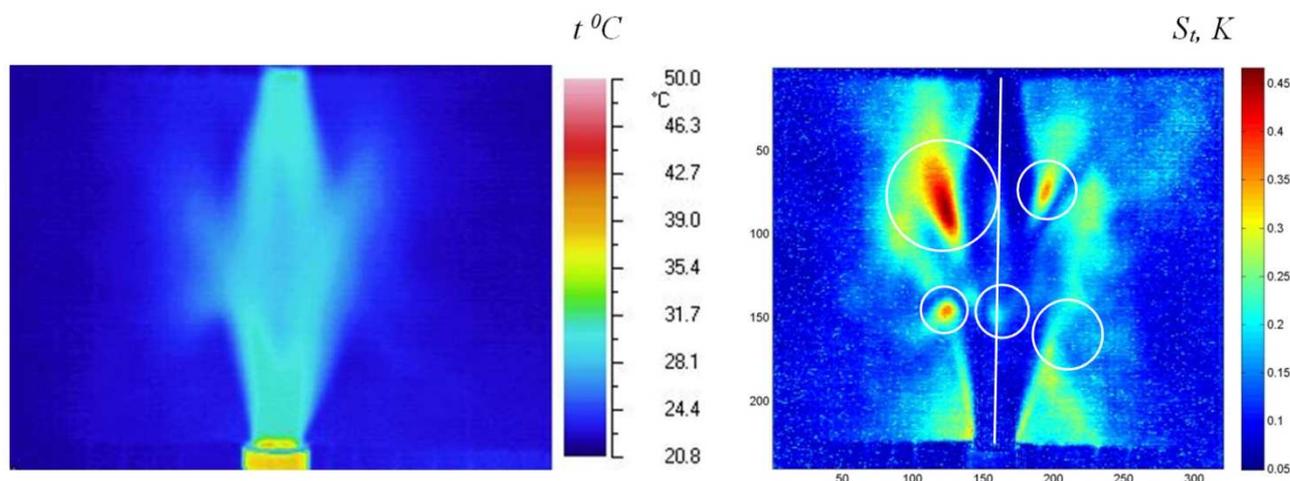


Рис. 6. Исходное (один кадр) тепловизионное изображение (а) и поле стандартного отклонения температуры S_t (б) соударяющихся закрученных струй: $w_1 = 26$ м/с, $w_2 = 15$ м/с, $\gamma_1 = \gamma_2 = 15^\circ$, $t_h = 44$ °С, $t_c = 28$ °С, $t_{oc} = 23$ °С, $\Theta = 0,745$, $K_{LM} = 0,815$, $l/d = 9,6$.

Во втором режиме (при $0,08 < K_{LM}^* < 0,38$) наблюдается увеличенная и дискретная вихревая зона столкновения, которая асимметрична относительно общей оси струйных аппаратов (рис. 7).



a

б

Рис. 7. Исходное (один кадр) тепловизионное изображение (*a*) и поле стандартного отклонения температуры S_t (*б*) соударяющихся закрученных струй: $w_1=36,4$ м/с, $w_2=25,9$ м/с, $\gamma_1=\gamma_2=15^\circ$, $t_h=45^\circ\text{C}$, $t_c=44^\circ\text{C}$, $t_{oc}=22^\circ\text{C}$, $\Theta=0,042$, $K_{tm}=0,194$; $l/d=9,6$.

Таким образом, было выявлено, что при столкновении струй в зависимости от условий возникает разная структура и соответственно различный механизм термомеханического взаимодействия, что должно быть учтено при проектировании технологических агрегатов.

Заключение

Установлены режимы взаимодействия соударяющихся струй.

Показано, как крутка влияет на механизм термомеханического взаимодействия встречных струйных потоков.

Выявлены критерии существования различных режимов.

Список литературы

1. Ахмедов Р.Б. Дутьевые газогорелочные устройства. - М. : Недра, 1977. - 272 с.
2. Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Миренский В.Ю., Худяков П.Ю. Тепловизионная идентификация турбулентных структур в газовых потоках // Приборы и техника эксперимента. – 2010. - № 1. - С. 155-158.
3. Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Худяков П.Ю. Особенности изменения термической структуры газовых импактных струй // Механика жидкости и газа. - 2013. - № 2. - С. 104-111.
4. Зыскин Б.И. Гидродинамика и теплообмен при смешении закрученных газовых струй с поперечным потоком : дис. ... канд. тех. наук: 01.04.14. - Екатеринбург, 1999. - 189 с.
5. Худяков П.Ю. Газодинамика и теплообмен при соударении прямооточных газовых струй : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.14. - Екатеринбург, 2013. - 28 с.

Рецензенты:

Сапожников Б.Г., д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и теплотехники ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Гальперин Л.Г., д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и теплотехники ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.