

## УСТАНОВКА ДЛЯ ПУЛЬСАЦИОННОГО НАГРЕВА ТЕЛ В СКРЕЩЕННЫХ ПОТОКАХ ГАЗА

© 2019 г. К. Г. Добросельский<sup>а, \*</sup>, А. С. Небучинов<sup>а</sup>, П. В. Юдин<sup>а</sup>,  
В. И. Палымский<sup>а</sup>, В. А. Антипин<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

<sup>б</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения  
Россия, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

\* e-mail: dobroselsky@mail.ru

Поступила в редакцию 19.03.2018 г.

После доработки 25.04.2018 г.

Принята к публикации 03.06.2018 г.

Разработана установка, предназначенная для изучения процессов нестационарного теплообмена при взаимодействии пульсирующей турбулентной струи нагретого воздуха с модельным объектом, помещенным в стационарный сносящий поток холодного воздуха. Подробно описана конструкция установки и ее основного элемента – устройства для создания пульсирующей струи. Приведены характеристики пульсирующей нагретой струи и сносящего потока в рабочем участке установки. Для примера приведены результаты нестационарного нагрева пластины пироэлектрического преобразователя пульсирующей нагретой струей и последующего охлаждения при прерывании потока теплого газа.

DOI: 10.1134/S0032816218060228

### ВВЕДЕНИЕ

Колебания расхода потока газа [1] или парогазовой струи [2] могут существенно влиять на гидродинамические и тепловые процессы в двигателях, энергетических установках, системах транспортировки и распределения жидких и газообразных энергоносителей, а также в других технических устройствах, работа которых связана с движением сред. Пульсирующие воздушные потоки используют для закалки деталей из металлических материалов [3].

Один из перспективных методов реализации пульсационного течения – использование прерывистой теплой струи, направленной перпендикулярно стационарному горизонтальному сносящему потоку. Важными примерами струй в поперечном потоке являются топливные форсунки, дымовые трубы, газоструйное охлаждение пленки на лопатках турбин [4, 5].

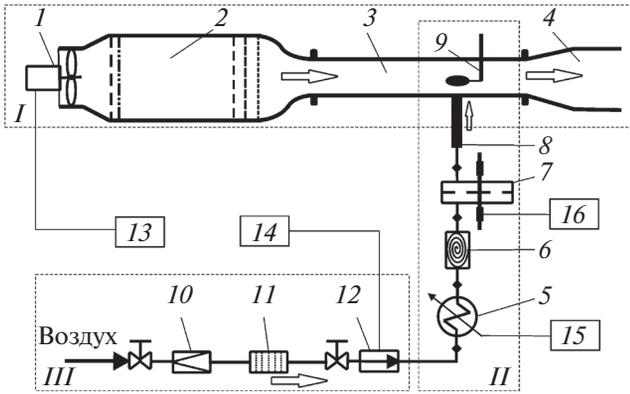
В данной работе описана экспериментальная установка, предназначенная для исследования взаимодействия пульсирующей турбулентной нагретой струи воздуха с телом (модельным объектом), помещенным в сносящий поток холодного воздуха. Кроме того, установка позволяет измерять мгновенные локальные параметры течения и изучать процессы теплообмена. Приведен при-

мер результатов исследований импульсного нагрева вертикальной струей пульсирующего воздуха тонкой пластинки из пироэлектрика в горизонтальном потоке воздуха. Пульсации температуры позволяют использовать пироэлектрик в качестве преобразователя тепловой энергии в электрическую.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки для исследования пульсирующих турбулентных течений представлена на рис. 1. Установка состоит из трех основных частей: аэродинамического канала (I), блока нагревателя и пульсатора (II) и системы подведения воздуха (III). Габаритные размеры установки  $3.4 \times 1.6 \times 0.6$  м.

Аэродинамический канал I содержит осевой вентилятор 1 (EL 315 D2 01), который подает воздух в канал, камеру формирования ударного профиля скорости 2 с хонейкомбом и конфузуром, рабочий участок 3, диффузор и вытяжную систему 4. Основными элементами блока II, куда входят также нагреватель струи и пульсатор, являются омический нагреватель 5, демпфер пульсаций 6 с металлической сеткой внутри и дисковый пульсатор 7. После пульсатора установлена трубка 8, через которую горячий воздух подается в ра-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. 1 – вентилятор; 2 – камера формирования профиля; 3 – рабочий участок; 4 – диффузор; 5 – нагреватель; 6 – демпфер; 7 – пульсатор; 8 – трубка подачи воздуха; 9 – держатель; 10 – редуктор; 11 – фильтр; 12 – расходомер; 13 – блок управления вентилятором; 14 – блок управления расходом; 15 – блок управления нагревателем; 16 – блок управления двигателем пульсатора.

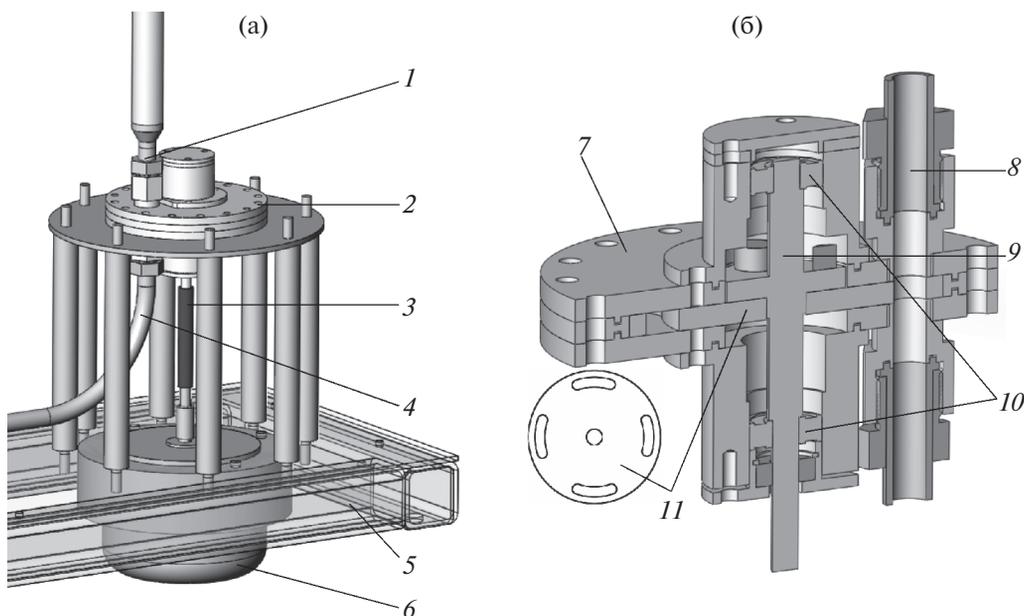
бочий участок. Держатель 9 позволяет удерживать и перемещать модельное тело. Подводящая часть III установки состоит из трубопровода, по которому воздух из напорной воздушной линии через редуктор 10 проходит через фильтр мелкой очистки 11 (5 мкм) и контроллер-расходомер 12.

Рабочий участок установки, изготовленный из оргстекла толщиной 10 мм, имеет форму прямоугольного параллелепипеда квадратным попереч-

ным внутренним сечением  $0.125 \times 0.125 \text{ м}^2$  и длиной 1.0 м. Управляющий блок 13 позволяет плавно менять вращение вентилятора, обеспечивая поддержание средней скорости ядра потока в рабочем участке в диапазоне  $u = 0.5\text{--}30 \text{ м/с}$ . Указанный диапазон изменения скорости потока выбирался таким образом, чтобы, с одной стороны, реализовать турбулентные режимы течения в рабочем участке установки, а с другой – обеспечить приемлемые условия для визуальных наблюдений и видеосъемки структуры исследуемых течений.

Таким образом, в конструкции установки была реализована схема организации нестационарного теплообмена между основным воздушным потоком и струей пульсирующего нагретого воздуха. Одним из важнейших элементов установки является пульсатор. На рис. 2 представлена схема пульсационного блока. Привод пульсатора осуществляется электродвигателем 6 постоянного тока ПЯ-250Ф номинальной мощностью 360 Вт. Частоту пульсаций можно варьировать в широких пределах в соответствии со скоростью вращения вала электродвигателя, соединенного с наружным источником питания Gwinstek SPS-3610 (16 на рис. 1).

В состав блока пульсации входит пластинчатый клапан – диск 11 (рис. 2) с четырьмя отверстиями, который расположен на оси 9 внутри неподвижного корпуса 7. Стальной диск ( $\text{Ø}95$  и толщиной 5.8 мм), прерывающий поток, имеет четыре радиально расположенных щелевых от-



**Рис. 2.** Пульсационный блок: а – внешний вид; б – пульсатор в разрезе (высота – 115 мм, диаметр – 128 мм). 1 – выходная трубка; 2 – пульсатор; 3 – соединительная муфта; 4 – входная трубка; 5 – силовая рама; 6 – электродвигатель; 7 – неподвижный корпус; 8 – воздушный тракт; 9 – ось; 10 – подшипники; 11 – диск и схема отверстий.

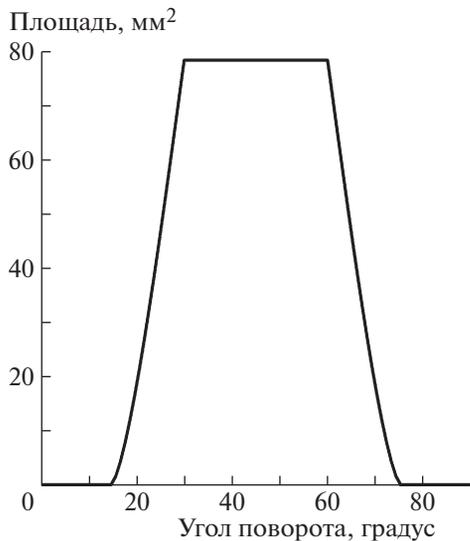


Рис. 3. Зависимость площади сечения выходного отверстия трубки пульсатора от угла поворота диска.

верстия шириной 10 мм. Диск свободно вращается с гарантированным зазором.

При вращении диска относительно корпуса с определенной частотой воздушный поток, который проходит через пульсатор, периодически перекрывается. Ось 9 установлена на двух шарикоподшипниках 10 закрытого типа и зафиксирована плотной посадкой.

На рис. 3 представлены результаты расчета изменения площади сечения отверстия входной трубки внутренним диаметром 10 мм при вращении диска пульсатора. Рассматривается случай, когда диск поворачивается на  $90^\circ$ . Периодические изменения площади сечения трубки при вращении диска формируют струю с прерывистым расходом.

Весь тракт подготовки и подачи горячего воздуха для снижения тепловых потерь при подаче струи в рабочий канал установки снаружи покрыт теплоизолирующим слоем минеральной ваты.

### СНОСЯЩИЙ ОСНОВНОЙ ПОТОК

Для измерения скорости основного сносящего потока в рабочем участке аэродинамического канала устанавливали анемометр. Использовалась технология точечных измерений НВА. Предварительные измерения проводились в пустом канале в нескольких сечениях на расстоянии 0.4–0.7 м от начала рабочего участка. Получено, что профили скоростей в этой области не изменяются. Более полные измерения были проведены на расстоянии 0.5 м от входа в рабочий участок и определяли распределение (профиль) скорости по высоте канала от 0 до 70 мм для некоторых заданных

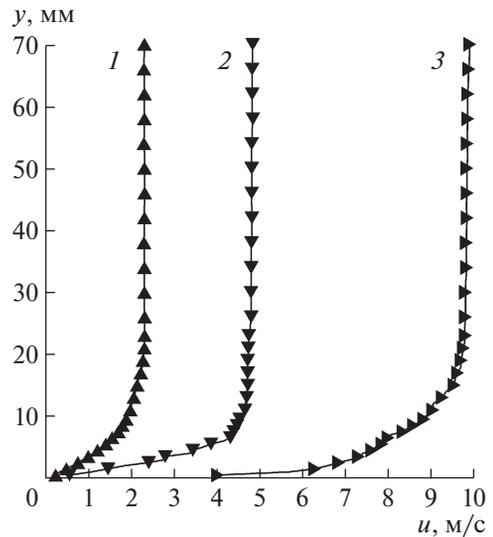


Рис. 4. Профили скорости сносящего основного потока в рабочем участке установки при различных значениях расхода:  $u = 2.3$  м/с (1), 4.8 м/с (2), 9.8 м/с (3).

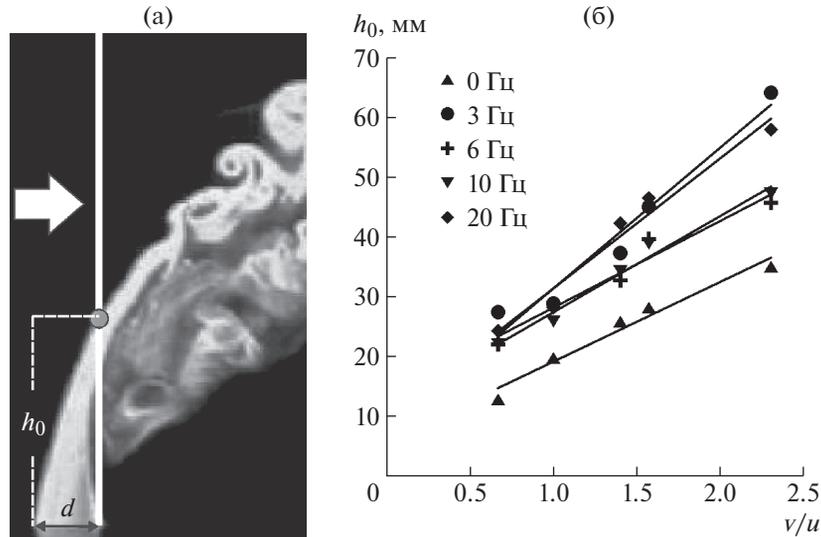
режимов потока. На каждой фиксированной высоте с интервалом 0.5 мм регистрировали массив мгновенных скоростей. Далее эти данные обрабатывали для оценки средних значений скорости (по времени) на каждой высоте и соответствующие отклонения от среднего. По результатам экспериментов определялась средняя скорость потока воздуха и ее среднеквадратичные пульсации.

На рис. 4 показаны профили скоростей основного сносящего потока, числа Рейнольдса для которых соответствуют значениям  $Re_D = 1.9 \cdot 10^4$  (1),  $4 \cdot 10^4$  (2),  $8.2 \cdot 10^4$  (3), где  $D$  — эквивалентный диаметр по сечению рабочего участка канала.

Изучение формы профиля скорости сносящего основного потока при стационарном режиме течения показало наличие ядра потока, движущегося с постоянной скоростью  $u$ , и пограничного слоя шириной порядка 10–15 мм на стенках и дне рабочего канала. При этом степень турбулентности продольной составляющей скорости в ядре потока в центральной части рабочего участка установки составляла  $Tu \approx 0.5\%$ .

### СТРУЯ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ

Параметры пульсирующего нагретого струйного течения зависят от расхода газа и температуры потока воздуха, проходящего через нагреватель газа и пульсатор. Расходомер-контроллер (рис. 1) позволяет устанавливать и контролировать скорость расхода газа до 600 л/мин. Мощность, рассеиваемую на нагревателе (до 2 кВт), можно плавно регулировать, изменяя электрическое напряжение на нагревательном элементе (15, рис. 1). Нагретый воздух проходит через



**Рис. 5.** Форма струи пульсирующего поперечного потока: **а** – схема измерений высоты подъема  $h_0$  струи относительно сопла диаметром  $d$  (вертикальная плоскость проходит через центр струи); **б** – высота подъема струи при различной частоте пульсаций. Стрелкой показано направление движения основного потока.

демпфер объемом 1 л и попадает в пульсатор, после которого формируется струя, направляемая перпендикулярно сносящему потоку. Подводящий канал пульсирующей струи изготовлен из стальной трубы 8 круглого сечения длиной 0.8 м и внутренним диаметром  $d = 19$  мм. Температура струи на выходе измерялась хромель-алюмелевой термопарой и не превышала обычно  $135^\circ\text{C}$ .

Для визуализации формы струи в поперечном потоке использовали капли водного раствора глицерина диаметром до 5 мкм. Для видеосъемки картины течения в этих экспериментах использовали монохромную камеру Canon EOS1100D, для создания светового ножа использовали непрерывный лазер LSR532H-2.5W-LN. Камера позволяла проводить съемку со скоростью 30 кадров/с.

Расход “холодной” струи в этих измерениях  $Q = 80$  и  $120$  л/мин, что соответствовало средним скоростям  $v \approx 4.7$  м/с и  $7.0$  м/с. Числа Рейнольдса по диаметру трубы составляли  $Re_d \approx 5.9 \cdot 10^3$  и  $8.8 \cdot 10^3$  соответственно. Измерения проводили при частоте пульсаций расхода струи  $f = 3, 6, 10$  или  $20$  Гц. Скорость сносящего основного потока составляла  $u \approx 3, 5, 7$  м/с. По вертикально прямой, проведенной через правый край трубки, определяли высоту поднятия струи при максимальном импульсе в струе (точка по левому краю струи на рис. 5а). При перекрытии струи в пульсаторе расход газа был равен нулю, что фиксировалось на всех видео.

На рис. 5б показана зависимость высоты поднятия струи  $h_0$  от отношения скоростей струи и потока  $v/u$  при различных значениях частоты пульсаций струи  $f$ . Для случая  $f = 0$  Гц результаты

наших измерений в интервале  $v/u \approx 0.6–2.3$  качественно близки к значениям  $h_0$ , наблюдавшимся при пульсации потока, и могут быть сопоставлены с наблюдениями в работе [6]. Результаты наших измерений показали, что пульсирующая струя сильнее проникает в сносящий поток по сравнению со стационарной струей, однако при повышении частоты пульсаций от 6 до 20 Гц высота подъема слабо зависит от частоты. Подобные наблюдения в работе [7] показали, что при низких частотах пульсаций перпендикулярной струи глубина проникновения в сносящий основной поток проходит через максимум и превосходит высоту подъема стационарного потока при  $f = 0$  Гц.

Были выполнены измерения средней температуры в рабочем участке для случая стационарной нагретой струи в сносящем основном потоке в зависимости от скорости потока. Измерения проводили по вертикали, проведенной через правый край трубки (см. рис. 5а). Результаты измерений представлены на рис. 6. Показаны графики температурных профилей в зависимости от удаления от среза сопла струи при различных скоростях сносящего потока  $u$ . При этом средняя скорость струи  $v \approx 4.7$  м/с (расход  $Q = 80$  л/мин поддерживался постоянным), а температура на выходе  $T = 134^\circ\text{C}$ . Температура сносящего потока составляла  $T_0 = 22.7^\circ\text{C}$ .

Таким образом, в работе были определены нижние границы параметров распространения перпендикулярной струи в сносящем потоке, которые указывают области использования разработанной схемы взаимодействия течений. При пульсирующих режимах перпендикулярная струя поднимается выше, чем без пульсаций, что видно

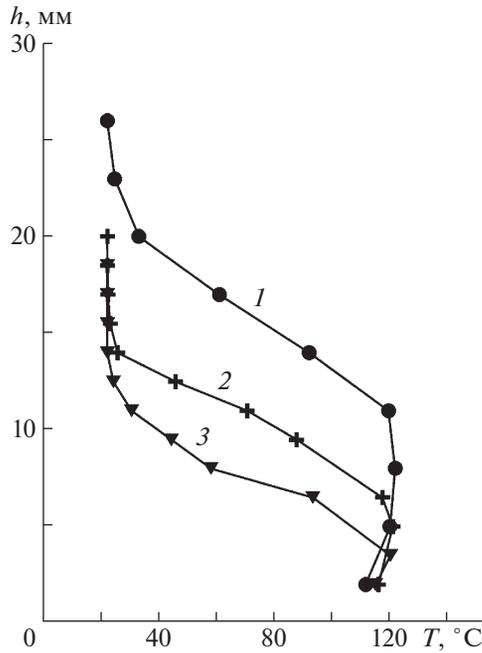


Рис. 6. Изменение температуры в потоке по высоте в зависимости от скорости  $u$ : 1 – 3 м/с, 2 – 5 м/с, 3 – 7 м/с.

из рис. 5б. При расходе струи  $Q = 80$  л/мин, что соответствует скорости  $v \approx 4.7$  м/с, начиная с высоты 10–15 мм при скорости потока  $u \leq 5$  м/с данная экспериментальная установка позволяет определить область наибольших температурных пульсаций.

### ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЛАСТИНКА В СКРЕЩЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКАХ

Пироэлектрики позволяют преобразовывать колебания температуры в колебания электрического потенциала на обкладках пластины из пироэлектрического материала [8]. В первом приближении разность потенциалов пропорциональна изменению температуры пластины, поэтому, регистрируя вариации электрического напряжения на обкладках пластинки малоинерционного пироэлектрического датчика, можно судить об амплитуде и частоте колебаний температуры окружающей среды.

Для изучения процессов нестационарного теплообмена на границе модельный объект–газ в рабочем участке установки была помещена бронзовая пластина  $\varnothing 27$  мм и толщиной 200 мкм, на поверхность которой была нанесена пленка пироэлектрика из ЦТС (цирконат-титанат свинца) керамики толщиной 220 мкм и диаметром 20 мм. Пластину установили на высоте 30 мм от нижней стенки рабочего участка. Положение пластинки в канале показано на рис. 7а. Нагретая пульсирующая струя ориентирована перпендикулярно ос-

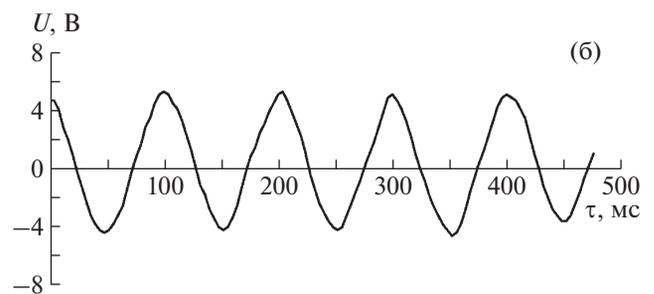
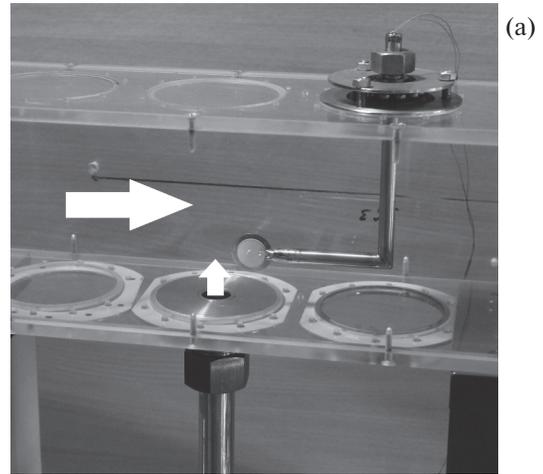


Рис. 7. Размещение пироэлектрической пластины в рабочем участке (а) и зависимость сигнала пироэлектрика от времени при частоте пульсаций газового потока 10 Гц (б).

новному горизонтальному потоку, направление движения которого показано стрелкой. Для примера на рис. 7б приведена осциллограмма зависимости регистрируемого напряжения  $U$  от времени при частоте пульсаций нагретого потока  $f = 10$  Гц, скорости потока  $v = 4.7$  м/с и температуре  $T = 134^\circ\text{C}$ ; скорость основного потока в рабочем участке  $u = 3$  м/с. Измерения напряжения проводились цифровым осциллографом ADS-2061 MV с входным сопротивлением 10 МОм. Как следует из этого рисунка, период колебаний температуры пластины пироэлектрика совпадает с периодом пульсаций нагретого потока газа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что данная установка может быть использована для пульсационного нагрева тел и эффективного перемешивания газов (жидкостей) при взаимодействии скрещенных турбулентных потоков. Дисковый клапан-пульсатор, в котором используется вращающийся диск с профилированными отверстиями, позволяет создавать пульсации расхода вертикальной струи с полным перекрытием в широком диапазоне частот. Показана также возможность использования установки, в

зависимости от решаемых задач, для четырех режимов работы перпендикулярной струи: изотермическая струя; газовая струя, нагретая до заданной температуры; пульсирующая изотермическая и нагретая пульсирующая струя. Продемонстрирована возможность взаимодействия перпендикулярной пульсирующей нагретой струи со сносящим основным потоком для пульсационного нагрева тонкой пластинки в диапазоне температур до 135°C.

Показана возможность использования пульсирующей нагретой струи в поперечном потоке для исследования преобразования низкопотенциального тепла в электричество с помощью пьезоэлектрического генератора в зависимости от частоты пульсаций температуры.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 16-19-00119).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Душин Н.С., Михеев А.Н., Михеев Н.И., Молочников В.М. // ПТЭ. 2014. № 4. С. 120. doi 10.7868/S003281621403015X
2. Klinner J., Willert C., Förster W., Beversdorff M., Mayer V. // 11th Intern. Symp. on Particle Image Velocimetry PIV'15. 14–16 Sept. 2015, Santa Barbara (CA), USA.
3. Иванов Д.А. // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 2. С. 64.
4. Smith S.H., Mungal M.G. // J. Fluid Mech. 1998. V. 357. P. 83.
5. Muppidi S., Mahesh K. // J. Fluid Mech. 2007. V. 574. P. 59. doi 10.1017/S0022112006004034
6. Висков А.Н., Горелов Ю.А., Стерлин В.А., Фарбер Б.А. // Ученые записки ЦАГИ. 1977. Т. 8. № 3. С. 127.
7. Eroglu A., Breidenthal R.E. // AIAA J. 2001. V. 39. № 3. P. 417. doi 10.2514/2.1351
8. Добросельский К.Г., Антупин В.А. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 2 (41). С. 47.