

УДК 533.011

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ГЕОМЕТРИИ ОТВЕРСТИЯ НА ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В СИНТЕТИЧЕСКИХ СТРУЙНЫХ ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМАХ (АКТУАТОРАХ)

© 2019 г. А. Каюм^{а,*}, А. Малик^а

^а Национальный технологический институт Шринагара, Факультет машиностроения, Шринагар, Индия

* E-mail: adnan@nitsri.ac.in

Поступила в редакцию 17.04.2018 г.

После доработки 05.12.2018 г.

Принята к публикации 20.12.2018 г.

Синтетическая струя является новым способом организации пульсационного нестационарного течения, которое переносит линейный импульс в окружающее пространство путем поглощения и выбрасывания жидкости из полости с колеблющейся диафрагмой и потенциально полезна для охлаждения электроники. В настоящей работе производится численный анализ, нацеленный на исследование влияния изменения геометрических параметров отверстия и частоты возбуждения на флюидику синтетической струи. Подвижная пьезоэлектрическая диафрагма моделируется граничным условием с постоянной амплитудой напряжения. Вычисления выполнены с использованием пакета COMSOL 5.3a Multiphysics. Настоящее исследование концентрируется на рассмотрении синтетических струй, образованных в одной цилиндрической полости, которая имеет отверстия разного типа, такие как одиночное (круглое) отверстие, три таких отверстия, одиночную прямоугольную щель, или три прямоугольных щели. Для одиночного круглого отверстия и одиночной прямоугольной щели площади выходного сечения были выбраны равными 7.0 мм^2 , тогда как для множественных круглых отверстий и прямоугольных щелей площади выходного сечения равнялись 21.0 мм^2 . Скорость синтетической струи достигает максимума, когда диафрагма возбуждается с оптимальной частотой. В случае синтетической струи с единственным круглым отверстием оптимальная частота почти такая же, как и в случае отверстия в виде одиночной прямоугольной щели; однако для множественных отверстий оптимальная частота ниже, чем для синтетической струи из единственного отверстия. Правильность результатов моделирования проверяется изучением их независимости от параметров сетки, временного шага и формы области и подтверждается имеющимися экспериментальными данными. Результаты моделирования, полученные в данном исследовании, замечательны тем, что они дают первичную точку отсчета для расчетов влияния частоты возбуждения и формы отверстия. Проведенное исследование показывает, что максимальное значение среднего коэффициента теплопередачи равно $86.5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ для отверстия в виде одиночной прямоугольной щели, что на 21% больше по сравнению с одиночным круглым отверстием. Для отверстия в виде одиночной прямоугольной щели, когда отношение расстояний от отверстия до нагревателя (Z/b) равно 80, значение коэффициента теплопередачи равно $112.5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, что примерно на 20.3% больше по сравнению с одиночным круглым отверстием при $Z/d = 14$, и тем самым приводит к лучшим эксплуатационным качествам.

Ключевые слова: приводной механизм в виде синтетической струи, Comsol Multiphysics, пьезоэлектрическая диафрагма, средняя теплопередача, охлаждение электроники

DOI: 10.1134/S056852811904008X

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

C_E — матрица жесткости, Па

d_c — ширина полости, м

d — ширина отверстия, м

e^T — матрица напряжений электрического поля, С/м^2

E – электрическое поле, Н/С

f – частота колебаний диафрагмы, Гц

f_H – частота Гельмгольца, Гц

h_c – высота полости, м

h_o – высота отверстия, м

h_{avg} – средний коэффициент теплопередачи, Вт/м²К

h_x – коэффициент теплопередачи вдоль оси X , Вт/м²К

h_y – коэффициент теплопередачи вдоль оси Y , Вт/м²К

L – длина прямоугольной щели или характерная длина, м

L_H – длина фольги нагревателя из нержавеющей стали, м

Re – среднее число Рейнольдса, рассчитанное по U_o , безразмерная величина

S – число Стокса, безразмерная величина

s – расстояние или шаг между отверстиями, м

S_r – число Струхала, безразмерная величина

T – период времени, с

T_a – средняя температура окружающей жидкости, К

T_s – средняя температура нагретой поверхности, К

U_o – средняя характерная скорость, м/с

u_a – скорость звука, м/с

V – мгновенное напряжение, вольт

V_{exc} – амплитуда напряжения возбуждения, вольт

X – координата вдоль главной оси фольги из нержавеющей стали, м

Y – координата вдоль главной оси фольги из нержавеющей стали, м

Z – координата по нормали к нагретой пластине, м

$\frac{z}{b}$ – расстояние по оси, соответствующее h_{avg} , для отверстия в виде прямоугольной щели $\frac{z}{d}$ –

расстояние по оси, соответствующее h_{avg} , для цилиндрического отверстия

Греческие символы

μ – динамическая вязкость воздуха, Па · с

μ_T – турбулентная вязкость воздуха, Па · с

ρ – плотность воздуха, кг/м³

ν – кинематическая вязкость воздуха, м² · с⁻¹

ϵ_{ij} – матрица смещений деформации

ϵ – диэлектрическая постоянная, безразмерная величина

σ – механическое напряжение в пьезонакладке, Н/м²

Управление потоком может быть использовано для того, чтобы задержать ламинарно-турбулентный переход, уменьшить турбулентность, избежать отрыва потока и изменить поле течения многими разными способами. Одним из наиболее широко исследованных механизмов среди различных активных приспособлений по управлению потоком является приводной механизм (актуатор) с нулевым чистым притоком массы, известный как синтетический струйный актуатор. Синтетические струйные актуаторы показали свою перспективность в осуществлении управления потоком, в связи с их способностью генерировать последовательность вихревых колец, которые распространяются от отверстия актуатора без какой-либо добавки массы к потоку, что, таким образом, позволяет избежать потребности в дополнительном подводе жидкости. Смит и соавт. [1] изучили преимущества простейшей синтетической струи над непрерывной струей и сделали вывод, что синтетическая струя формируется из окружающей жидкости и поэтому, в отличие от непрерывной струи, не требует непрерывного подвода жидкости извне. Синтетическая струя является квазистационарной струей жидкости, образованной при периодическом движении диафрагмы, заключенной внутрь полости с отверстиями в одной или нескольких стенках. Шлирен фотографии совместно с измерениями скорости и тепловой анемометрией были использованы для визуализации и описания особенностей течения. По сравнению со

стандартной двумерной струей найдено, что синтетическая струя увлекает больше жидкости из окружающей среды, но теряет импульс быстрее по сравнению с непрерывной струей. Ряд авторов [2–4] выполнили исследования, используя разные методы возбуждения и различные материалы для синтетических струйных актуаторов. В [5] механические или акустические драйверы использовались для генерации усредненного по времени чистого движения жидкости. Стоячие волны формировались в круглой трубке с жидкостью, приводимой в движение акустическими методами, для генерирования пульсирующей скорости. В [6] в качестве рабочей жидкости вместо воздуха использовалась вода. Узел в виде цилиндрического поршня был использован в качестве актуатора с круглым отверстием на противоположной стенке. Используя визуализацию потока, авторы [6] классифицировали наблюдаемые картины течения в зависимости от чисел Рейнольдса и Струхала. Было предположено, что струя с нулевым чистым притоком массы формируется, когда завихренность уносится от генератора быстрее, чем завихренность диффундирует за счет вязкости. Для осесимметричной струи в [7] были предложены критерии образования струи, базирующиеся на числах Рейнольдса и Стокса, для относительно толстых пластин с отверстиями (отношение ширины к гидравлическому диаметру больше двух). Критерий образования струи для отверстий разной формы был дан в [8]. Анализ подобия течения в дальней зоне был проведен в [9]. Проведенные экспериментальные исследования обеспечили хорошее понимание физики течения как вблизи, так и вдали от синтетической струи. Экспериментальное исследование с прямым сравнением синтетической струи, истекающей из отверстия в полости, с непрерывной струей было выполнено в [10]. Было найдено, что характеристики этих струй сопоставимы при близких наборах условий, а максимальный коэффициент теплопередачи в 11 раз больше по сравнению со случаем естественной конвекции. Один из авторов настоящего исследования вместе с соавторами [11] дали детальное описание параметров синтетической струи под воздействием амплитудной модуляции и наблюдали существенное изменение основных характеристик синтетической струи в результате этого воздействия. Эти же авторы [12] последовательно описали эффект интенсификации теплопереноса из-за взаимодействия поперечных потоков в синтетической струе и ламинарным пограничным слоем на плоской пластинке. Наблюдалось увеличение осредненного коэффициента теплопередачи с ростом амплитуды возбуждения синтетической струи, максимальный коэффициент теплопередачи возрастал на 44%. В [13] было предложено варьировать высоту полости, используя однокомпонентный нагреватель. Более того, предлагалось, что это оптимальная комбинация, составленная из всех геометрических параметров, для которой актуатор действовал бы на полной мощности. Максимальная скорость струи была измерена на двенадцатикратной ширине щели вместо четырехкратной ширины щели. В [14, 15] была разработана общая элементная модель синтетического струйного актуатора с пьезоэлектрической диафрагмой для оценки нелинейного динамического отклика синтетической струи как функции размеров прибора и свойств материала. Авторы обсудили методику оценки параметров модели и провели экспериментальную проверку своей модели. Было найдено хорошее согласие между предсказаниями модели и экспериментальными данными. Идентифицированы две характерные резонансные частоты, а именно, собственная частота пьезоэлектрической диафрагмы и частота Гельмгольца (акустическая резонансная частота) резонансной полости. В [16] было проведено экспериментальное исследование различных конфигураций с центральным отверстием, окруженным несколькими вспомогательными отверстиями. Обнаружено увеличение теплообмена при использовании синтетической струи с несколькими отверстиями. Полученные результаты указывают на приблизительно двенадцатикратное увеличение коэффициента теплопереноса в случае нескольких отверстий по сравнению с одиночной синтетической струей и 30%-й прирост по сравнению с обычной струей. Наблюдался переход, происходящий в поведении жидкости от нескольких струй к одиночной комбинированной струе, что приводило к большим значениям коэффициента теплопередачи при меньшем расстоянии по оси. В [17] изучены характеристики синтетических струй с большими значениями отношения длины щели к ее ширине. Струя падала на горячую поверхность при разных частотах, различных значениях ширины щели и расстояния от отверстия. Максимальное значение числа Нуссельта достигалось при минимальном замеренном расстоянии, соответствующем пятикратной ширине щели. Число Нуссельта убывало с ростом расстояния, тогда как низкие частоты колебаний имели тенденцию к меньшему затуханию по сравнению с высокими частотами. В [18] были исследованы струи с умеренными значениями отношения длины щели к ее ширине. Результаты свидетельствуют о 40%-ном приросте коэффициента теплопередачи по сравнению со стационарными струями. Этот эффект наблюдался для разных чисел Рейнольдса, в синтетических струях щелевого типа наибольшее значение числа Нуссельта достигалось, когда источник нагрева был помещен на расстоянии пятнадцати гидравлических диаметров от выхода из отверстия. В [19] было

Таблица 1. Расположение и размеры отверстий синтетических струй

	Тип отверстия	b или d (мм)	L (мм)	s/b или s/d
Случай 1	Одиночная прямоугольная щель	0.7	10	
Случай 2	Одиночное круглое отверстие	3		
Случай 3	Три прямоугольных щели	0.7	10	3, 5, 7
Случай 4	Три круглых отверстия	3		1.5, 2, 2.5

выполнено экспериментальное исследование для синтетической струи, истекающей из двойного отверстия и граничащей с турбулентным пограничным слоем. Было найдено, что наибольшая интенсификация теплопереноса составляет около 55.48% по сравнению с одиночным отверстием при напряжении актуатора 55 вольт. Было также найдено, что интенсификация теплопереноса выше в случае амплитудной модуляции. В [20] три круговых пьезоэлектрических актуатора с переменными механическими и электрическими граничными условиями были исследованы экспериментально с использованием пилообразных волновых сигналов. Для всех актуаторов изменения смещения при варьировании прижимного давления существенны по сравнению со значениями для диаграмм радиального поля на самых высоких уровнях в 17–18%. Любимов и Потехина [21] исследовали численно влияние синтетических струйных актуаторов на отрыв потока в S-образном диффузоре. Было найдено, что при увеличении числа Рейнольдса при постоянной разности давлений потери полного давления могут быть легко оценены, и в этой связи возрастают с ростом числа Маха на входе в диффузор. В [22] изучена двумерная модель вертикальной турбулентной струи, состоящей из газа и твердых частиц. Найдено, что осаждение частиц в потоке становится асимметричным и в этой связи интенсифицирует турбулентное смешение фаз. В [23] изучены поля течения, генерированные двойными синтетическими струями с выходами в виде углового шеврона и круглого патрубка. Найдено, что наличие выхода в виде углового шеврона приводит к образованию некруговых колец с дополнительными вихрями, направленными по потоку, и является причиной течения, направленного к оси струи в плоскости апекса и в противоположном направлении в плоскости выреза.

Много исследований было выполнено для определения характеристик синтетической струи и падения струи из одной полости для либо цилиндрического либо прямоугольного отверстия. Влияние формы отверстия на реальную частоту возбуждения и теплоперенос детально не обсуждалось. Максимальная эффективность синтетической струи из одиночного цилиндрического отверстия наблюдалась на частоте Гельмгольца, однако нет исследований, рассматривающих эффективность синтетической струи из многочисленных щелевых или другой формы отверстий на частоте Гельмгольца.

Настоящая работа направлена на моделирование синтетических щелевых актуаторов, нацеленных на охлаждение, и посвящена изучению влияния геометрических параметров отверстия и частоты возбуждения. Характеристики течения в синтетической струе из одиночной полости, имеющей отверстия разной формы, такие как одиночное круглое отверстие или тройное отверстие, одиночная прямоугольная щель или три щели, исследованы численно. Диафрагма актуатора состоит из тонкой медной пластинки, к которой прикреплена пьезоэлектрическая “накладка” (PZT–5H). Синтетический щелевой актуатор состоит из цилиндрической полости с внутренней вибрирующей диафрагмой диаметром $d_c = 40$ мм и высотой $h_c = 4.5$ мм (рис. 1а). В настоящем исследовании также исследуется интенсификация переноса тепла за счет падения синтетической струи на фольгу из нержавеющей стали длиной 50 мм и толщиной 0.1 мм, являющуюся источником тепла (рис. 1б). Области рабочей частоты и напряжения возбуждения на пьезоэлектрической диафрагме составляли 0–20 Гц и 0–450 вольт соответственно. В настоящем исследовании были рассмотрены четыре разных отверстия, а именно, одиночная прямоугольная щель, одиночное цилиндрическое отверстие, три прямоугольных щели и три цилиндрических отверстия, выравниваемых в направлениях осей X и Y , как показано на рис. 2а. Параметры отверстий и их расположения, использованные в настоящем исследовании, указаны в табл. 1, где площадь отверстий для прямоугольной щели приблизительно согласуется с соответствующей площадью круглых отверстий и длина (L) щели постоянна и равна 10 мм. Многочисленные синтетические струи образовывались в трех прямоугольных щелях или трех круглых отверстиях, сделанных в одной полости.

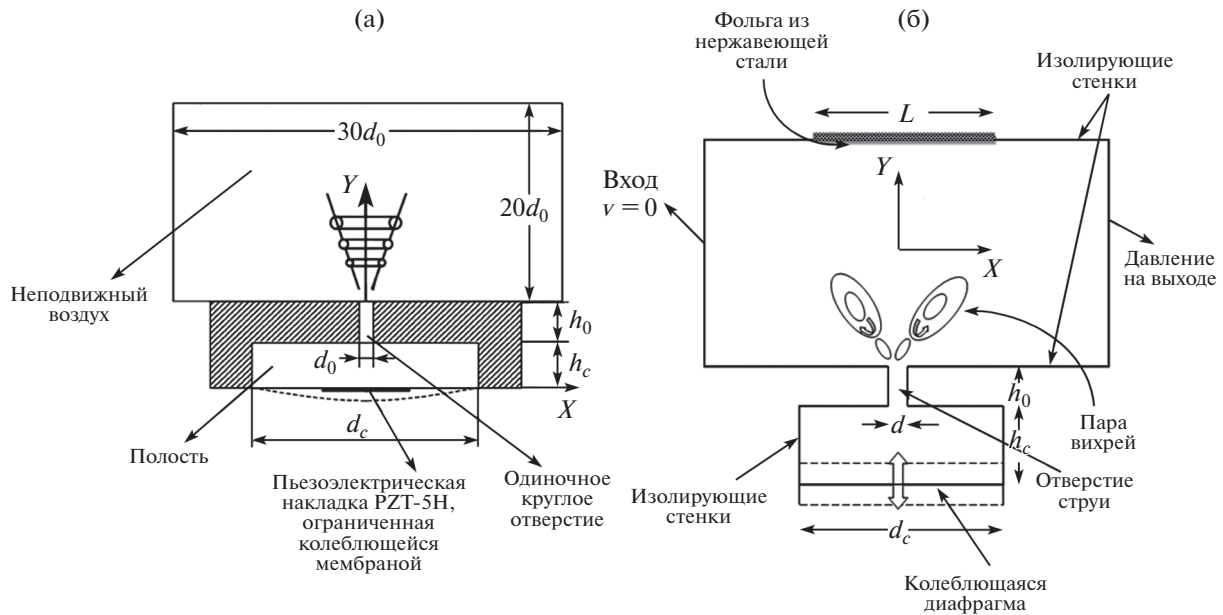


Рис. 1. Расчетная область и физическая модель: (а) моделирование течения синтетической струи; (б) изображение граничных условий для модели теплопереноса при падении синтетической струи на фольгу из нержавеющей стали

1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Этот раздел описывает детали численного моделирования, такие как геометрия, сетка и другие подробности типа граничных условий, генерации сетки вместе с управлением вычислениями, условиями сходимости и т.д. Проведено также изучение независимости результатов от сеточных параметров, таких как шаг по времени и пространственный шаг сетки. Наиболее сложной частью моделирования является манипулирование вибрирующей диафрагмой. Расчеты выполнены с помощью пакета COMSOL 5.3a Multiphysics для решения трехмерных нестационарных уравнений Навье—Стокса, осредненных по числу Рейнольдса, для несжимаемой жидкости при использовании k – ϵ модели турбулентности, связанной с специальным модулем для подвижной сетки ALE и пьезоэлектрическим модулем, описывающим движение диафрагмы. Диафрагма колеблется вверх и вниз синусоидальным или косинусоидальным образом. Для исследования влияния параметров актуатора на отдельные характеристики флюидики синтетической струи один из геометрических параметров изменялся в определенной области, тогда как остальные геометрические параметры поддерживались на исходных значениях. Область вычислений состояла из трех зон, которые включали в себя полость, отверстие и окружающую область, в которую вытекает струя. Поскольку для приведения системы в действие используется пьезоэлектрическая накладка (PZT–5H), необходимо рассматривать пьезоэлектрические эффекты. Пьезоэлектричество объединяет электрическое поведение материала и механические напряжения и деформации в самом материале. Взаимосвязанные уравнения, которые моделируют обратные пьезоэлектрические эффекты на диске, имеют вид

$$\sigma = c_E \epsilon - e^T E, \quad (1.1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \mathbf{F}, \quad (1.2)$$

$$\mathbf{F} = \nabla \sigma, \quad (1.3)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (1.4)$$

где $\mathbf{E}$ — электрическое поле, σ — напряжение в материале пьезонакладки, ϵ — тензор деформаций, возникших в пьезоэлектрическом материале и ϵ_{ij} обозначает компоненты тензора скоростей деформаций для пьезоэлектрической накладки.

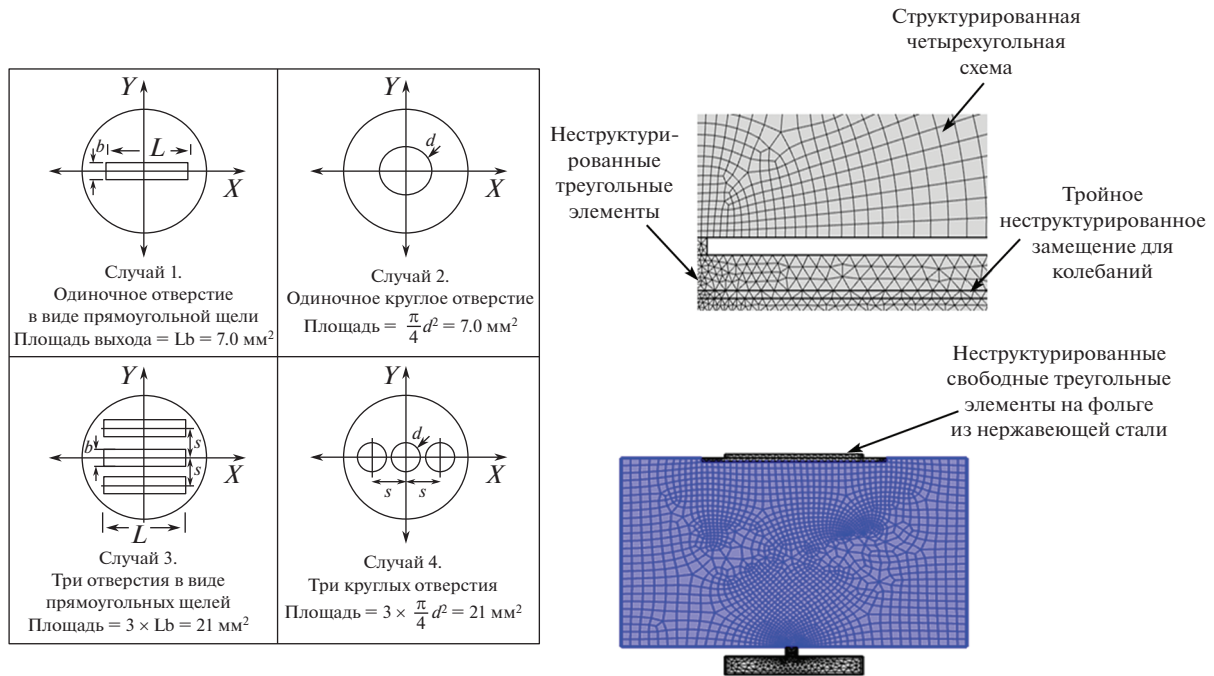


Рис. 2. (в цвете онлайн) (а) Схема конфигурации отверстий; (б) примеры сеток, изображающие неструктурированные треугольные и структурированные четырехугольные схемы в области жидкой синтетической струи; (в) синтетическая струя в области теплопереноса

Электрическое напряжение, приложенное на дне пьезонакладки, может быть задано в виде

$$V = V_{exc} \sin \omega t, \quad (1.5)$$

где V_{exc} — амплитуда напряжения возбуждения, V — мгновенное напряжение и ω — угловая частота диафрагмы. Пьезоэлектрическая постоянная e^T связывает механическое напряжение с электрическим полем в отсутствие механической деформации и c_E обозначает матрицу жесткости или упругости, когда электрическое поле постоянно. Уравнения (1.1–1.5) являются определяющими и представляют собой классические уравнения теории упругости, которые аппроксимируют пьезоэлектрические деформации диска.

Число Маха будет вычисляться для обоснования использования нестационарных уравнений Навье–Стокса, осредненных по числу Рейнольдса, для несжимаемой жидкости. Оно задается соотношением

$$M = \frac{U_o}{u_a}, \quad (1.6)$$

где U_o — характерная скорость жидкости и u_a — скорость звука в этой жидкости. В рассматриваемой задаче ожидается скорость не более 1 м/с, так что для этой задачи самое большое число Маха $M = 0.00294$, что оправдывает моделирование с использованием уравнений Навье–Стокса, осредненных по числу Рейнольдса, для несжимаемой жидкости.

Основные уравнения для жидкости внутри полости и окружающей среды моделируются несжимаемыми уравнениями Навье–Стокса в виде

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = \nabla [-p \mathbf{I} + (\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F}, \quad (1.7)$$

$$\rho \nabla \mathbf{u} = 0, \quad (1.8)$$

где μ — динамическая вязкость, μ_T — турбулентная вязкость из-за пульсаций скорости, ρ — плотность, $\mathbf{u}$ — поле скорости, p — поле давления и $\mathbf{F}$ — объемное поле сил.

Число Рейнольдса Re определяется соотношением

$$\text{Re} = \frac{U_o \rho d}{\mu}. \quad (1.9)$$

Характерная скорость U_o синтетической струи задается следующим образом:

$$U_o = L_o f = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \mathbf{u}(t) dt, \quad (1.10)$$

где f — частота колебаний, L_o — расстояние, которое жидкая пробка проходит в течение эжекционной части колебания, T — период одного колебания и $\mathbf{u}(t)$ — мгновенная скорость синтетической струи на срезе отверстия. Для колебательного течения в трубе число Стокса S определяется соотношением

$$S = \sqrt{\frac{2\pi f d^2}{\nu}}, \quad (1.11)$$

где d — диаметр отверстия и ν — кинематическая вязкость жидкости.

Число Струхала S_r определяется следующим образом:

$$S_r = \frac{\text{Re}}{S^2}. \quad (1.12)$$

Для исследования теплопередачи тепловой поток на нагретую поверхность создается нагревающим элементом и криволинейной поверхностной областью тонкой нержавеющей стальной фольги. Осредненный конвективный коэффициент теплопередачи (h_{avg}) задается выражением

$$h_{avg} = \frac{q''}{T_s - T_a}, \quad (1.13)$$

где q'' — поток тепла к нагретой поверхности, T_s — средняя температура нагретой поверхности и T_a — температура окружающей жидкости.

1.1. Геометрия и сетка

Полость синтетической струи делится на две области, первая из которых состоит из собственно полости и отверстия, а вторая включает в себя окружающий воздух. Граничные условия задаются на краю полости и в окружающей жидкости, в которую струя выбрасывается. Поверхности диафрагмы и полости рассматриваются как непроницаемые стенки и окружающий воздух задается давлением на выходе. Геометрическая область, показанная на рис. 1а и 1б, была покрыта сеткой неструктурированного вида (треугольные элементы) в полости и на срезе отверстия. Свободная треугольная неструктурированная схема была выбрана так, чтобы позволить относительное смещение узлов на диафрагме. Внешняя область жидкости была покрыта сеткой со структурированными четырехугольниками. Комбинирование неструктурированных и структурированных сеток существенно уменьшает время моделирования за счет ограничения числа узлов сетки. На рис. 2б и 2в соответственно даны примеры сеток для области течения жидкости и области теплопередачи синтетической струи, изображающие каждый узел на пересечении ребер этих сеток.

1.2. Исследование независимости от шага по времени, сетки и области.

Аналогично подходу, принятому в [24, 25], результаты моделирования в настоящем исследовании были расположены в соответствии с систематическим изучением независимости от времени и сетки. Оказывается, плотность сетки имеет большее влияние на решение там, где скорость больше. Для сетки со средним шагом и для грубой сетки относительные ошибки в максимуме скорости на срезе отверстия достигают соответственно 3.5% и 11.7% по сравнению с мелкой сеткой. На основе частоты возбуждения (f) был выбран шаг по времени величиной $1/1000f$ для возможности совершения 1000 временных шагов на один цикл, как показано на рис. 3а–3г. В качестве компромисса между точностью результатов и временем вычислений, для расчета окончательных результатов была выбрана сетка с промежуточным шагом. Изменения продольной скорости на срезе отверстия, полученные на разных шагах по времени, показали, что скорость нечувствительна к временному шагу. Для ближнего поля струи при исследовании зависимости

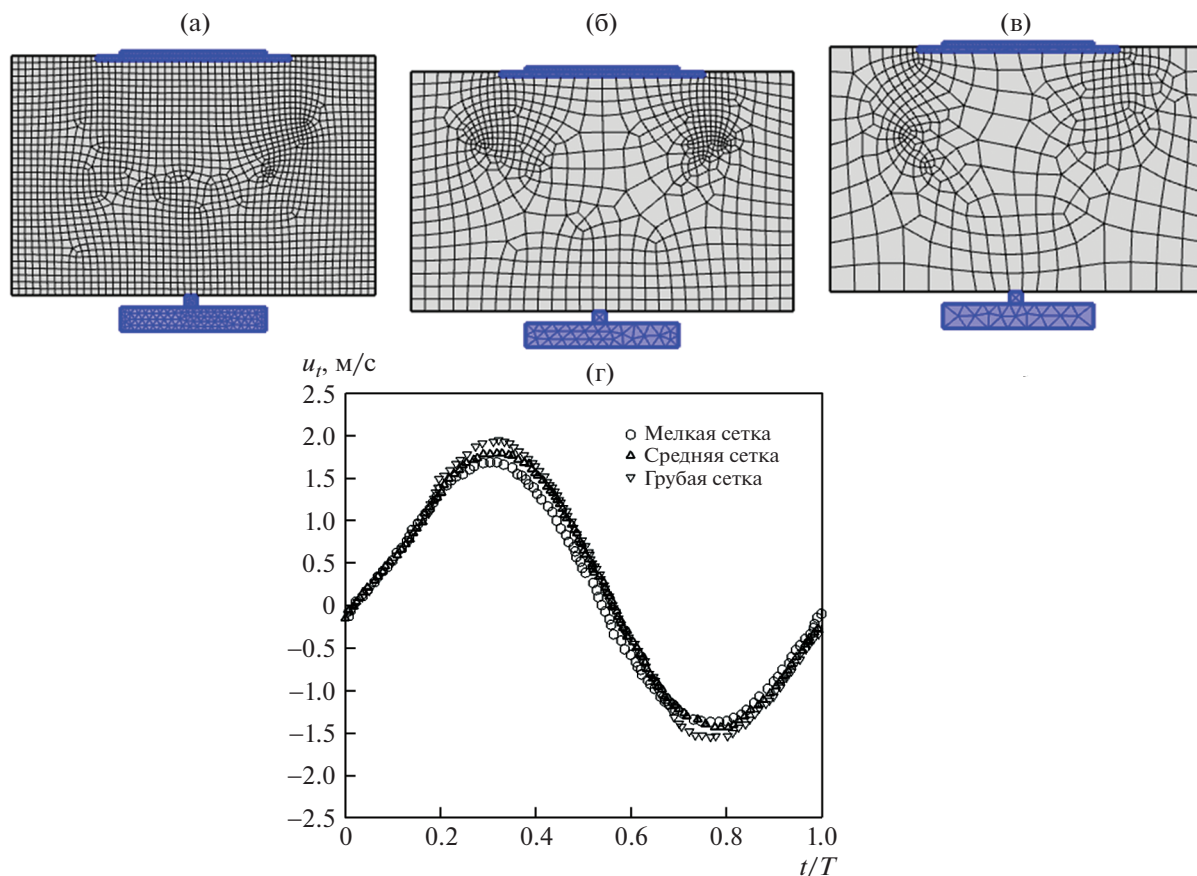


Рис. 3. Примеры сеток, изображающие неструктурированные треугольные и структурированные четырехугольные схемы в плоскости XZ : (а) мелкая, (б) средняя и (в) грубая сетка; (г) сравнение мгновенной скорости в центре отверстия в цикле, рассчитанном с разными размерами сеток для одиночного круглого отверстия синтетического струйного актуатора, работающего на частоте $f = 10$ Гц и напряжении возбуждения $V_{\text{exc}} = 300$ вольт

результатов от области расчета было найдено, что достаточным является размер области в тридцать калибров отверстия вдоль ее оси и 20 диаметров отверстия в боковом направлении. Для такой области в случае граничного условия, наложенного на концах внешней кромки, открытое граничное условие не оказывает влияния на параметры в области, близкой к отверстию. В табл. 2 приведены размеры сетки, число элементов и число узлов для каждой версии сетки, использованной в настоящем исследовании. Изменения мгновенной скорости на срезе отверстия, полученные с использованием этих трех сеток, изображены на рис. 3г.

1.3. Управление расчетами и сходимость

В настоящем исследовании поля течения синтетического струйного актуатора амплитуда мгновенного электрического напряжения, действующего как входной параметр для скорости, была приложена на границе пьезонакладки. Таким образом, синусоидальное движение сообщалось этой границе и течение во внешней области было инициализировано из состояния покоя. Каждый нестационарный вычислительный эксперимент продолжался примерно пять или шесть циклов до сходимости полученного решения. Используемый критерий сходимости требовал, чтобы масштабированные остаточные члены уменьшались до 10^6 для всех основных уравнений. Как только остаточные члены уменьшались до 10^6 , скорость струи на выходе не испытывала заметных изменений и считалось, что процесс сходимости решения завершен.

2. ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проверка достоверности процедуры проведенного моделирования осуществлялась с помощью сравнения с экспериментальными результатами [26]. Результаты моделирования, получен-

Таблица 2. Исследование измельчения сетки в использованной расчетной области

Область сетки	Размер грубой сетки	Размер промежуточной сетки	Размер мелкой сетки
Полость	$30 \times 58 \times 32$	$60 \times 109 \times 70$	$105 \times 215 \times 50$
Отверстие	$27 \times 15 \times 21$	$52 \times 28 \times 33$	$103 \times 55 \times 68$
Внешняя зона	$75 \times 64 \times 58$	$145 \times 120 \times 123$	$293 \times 252 \times 115$
Число элементов	343585	2646048	100005110
Число узлов	68717	529209	20001023

ные с использованием одинаковых численных условий, сравниваются на рис. 4а и 4б. С целью сравнения использовано граничное условие на подвижной мембране с одинаковым прогибом диафрагмы и амплитудой прогиба. Относительное отклонение настоящих результатов от опубликованных в [22] составляет 15.45%. Возможной причиной отклонения может быть неспособность (в случае, изложенном в [26]) нахождения направления течения с помощью тепловой анемометрии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В этом разделе обсуждаются изменения скорости течения на выходе из отверстия разной формы. Результаты трехмерного моделирования показывают, что наиболее значительные деформации происходят в осевом и радиальном направлениях. По этим причинам и из-за вычислительных ресурсов, имеющихся в наличии, была реализована осесимметричная модель, описывающая колебательные смещения мембраны.

Рисунок 4в изображает трехмерную осесимметричную модель диска на оптимальной частоте 32 Гц. Эта модель подвергается воздействию различных электрических напряжений до 450 вольт и соответствующие деформации при различных напряжениях изображены на рис. 4г. Из рис. 4г видно, что при напряжении ниже 300 вольт относительная ошибка составляет 9.38%, что вполне приемлемо и хорошо согласуется с результатами [27].

На рис. 5а–г изображены поверхностные контуры профилей скорости для синтетических струйных актуаторов с одним и тремя круглыми отверстиями и с одной и тремя прямоугольными щелями при напряжении и частоте возбуждения 300 вольт и 10 Гц соответственно. На рис. 5а показан контур скорости синтетической струи из одиночного круглого отверстия в фазе вдува во время $t = 5T/16$ на частоте 10 Гц. Видно, что максимальная скорость на выходе достигается в центре отверстия. При движении жидкости от отверстия скорость уменьшается экспоненциально и становится равной нулю в дальней зоне. На рис. 5б проиллюстрировано влияние трех отверстий на характеристики синтетической струи в момент $t = 5T/16$. Показано также, что завихренность имеет максимум вблизи отверстия. На рис. 5б можно видеть, что за ведущим сильным вихревым кольцом следует цуг меньших вихревых структур, что приводит к увлечению жидкости и вызывает боковое распыление струи. На рис. 5в приведены поверхностные контуры профилей скорости в момент $t = 5T/16$ для синтетических струйных актуаторов в случае единственной прямоугольной щели. Изображен волновой пакет в жидкости в проекции на выходное отверстие. В этом случае скорость струи больше по сравнению со скоростью одиночной синтетической струи из круглого отверстия и струйное течение усиливается в ближней зоне под влиянием индуцированного движения вихревой пары. На рис. 5г приведены характеристики течения в момент $t = 5T/16$ для синтетической струи в случае трех прямоугольных щелей. Как видно из рисунка, на выходе из трех прямоугольных щелей скорость жидкости внутри полости меньше по сравнению со скоростью при истечении из отверстия в виде одной прямоугольной щели. Отдельные струи быстро распыляются и сливаются вместе, образуя центральную струю, которая инициирует быстро растущий вихрь в дальней зоне течения, усиливая при этом смешение и уменьшая его скорость.

Профили средней осевой скорости для синтетической струи при частотах возбуждения 5 и 10 Гц приведены на рис. 6а и 6б соответственно. Из рис. 6а видно, что скорость на центральной линии возрастает до максимума при Z/b или $Z/d = 10-15$ в случае частоты возбуждения меньше 10 Гц и затем быстро затухает. Это происходит потому, что синтетическая струя растет быстрее в боковой части и быстро диффундирует в центральной части. На частотах около 5 Гц жидкость

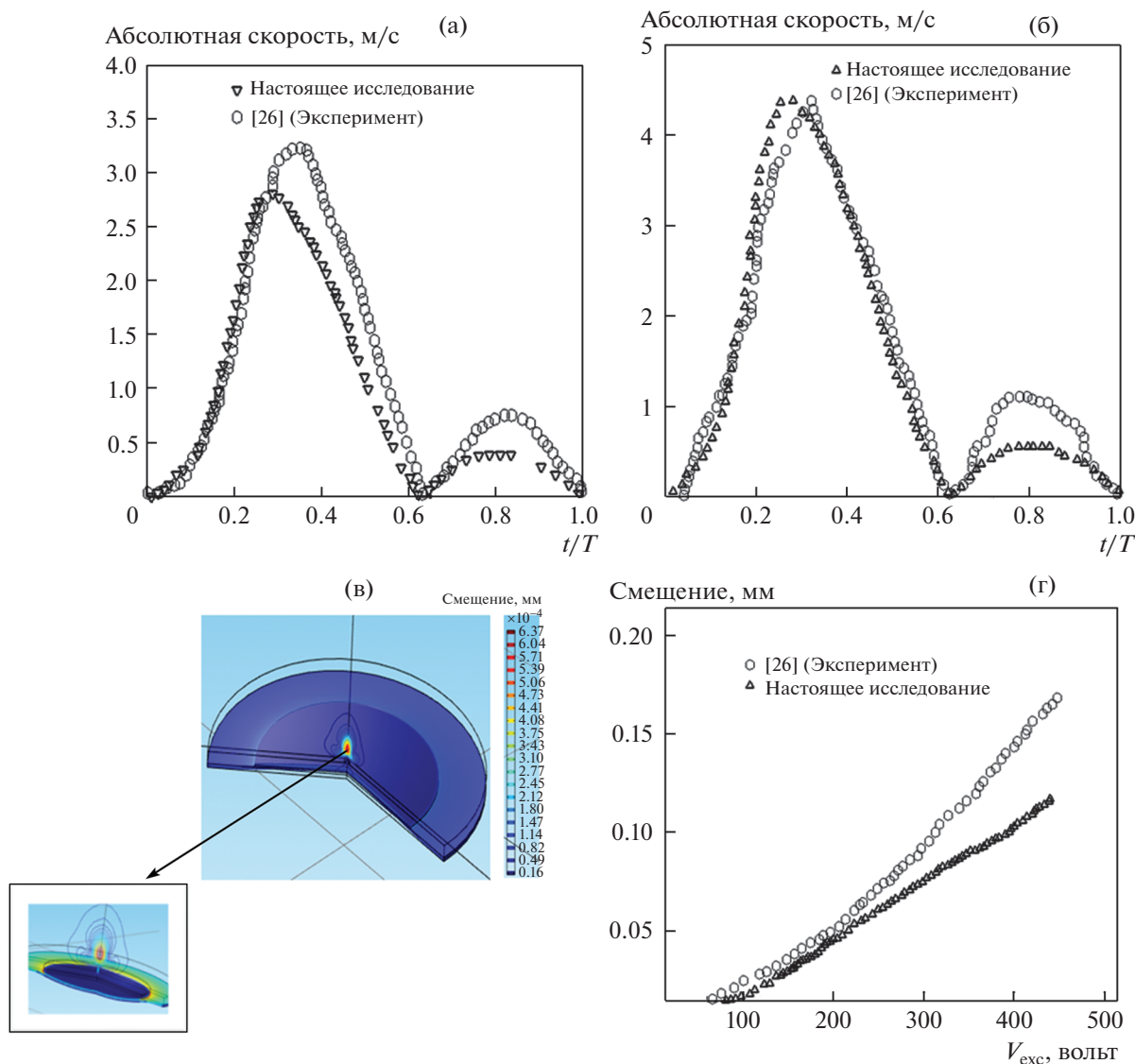


Рис. 4. (в цвете онлайн) Скорость как функция времени для биморфного пьезоэлемента PZT-5Н при разных частотах возбуждения: (а) $f = 32$ Гц и (б) $f = 50$ Гц; (в) трехмерная осесимметричная модель колеблющейся диафрагмы синтетического струйного актуатора, изображающая смещение на рабочей частоте $f = 10$ Гц и напряжении возбуждения 300 вольт; (г) зависимость смещения от напряжения для актуатора с биморфным пьезоэлементом PZT-5Н при частоте $f = 32$ Гц

сравнительно медленно выталкивается из полости, что приводит к относительно небольшой скорости вблизи выхода из отверстия. Как видно на рис. 6б, максимальная скорость по оси для одиночной прямоугольной щели больше по сравнению с одиночным круглым отверстием. Это является следствием того, что длина щелевого отверстия много больше диаметра круглого отверстия, что приводит к быстрому росту вихрей по обе стороны прямоугольного щелевого отверстия. Такое явление отсутствует для одиночного круглого отверстия.

Радиальные профили скорости для синтетического струйного актуатора с тремя прямоугольными щелями и тремя круглыми отверстиями приведены на рис. 6в и 6г. Как видно из рис. 6в и 6г, для конфигурации с тремя прямоугольными щелями средняя скорость струи меньше, чем соответствующая величина для струйного актуатора с одной прямоугольной щелью. Этот результат можно объяснить более интенсивным смещением вихрей, генерированных актуаторами с тремя прямоугольными щелями. Кроме того, потенциальная энергия, запасенная внутри полости, используется для интенсификации смещения; таким образом, происходит значительное уменьшение скорости на срезе отверстия. Найдено так же, что для трех прямоугольных щелей радиальная

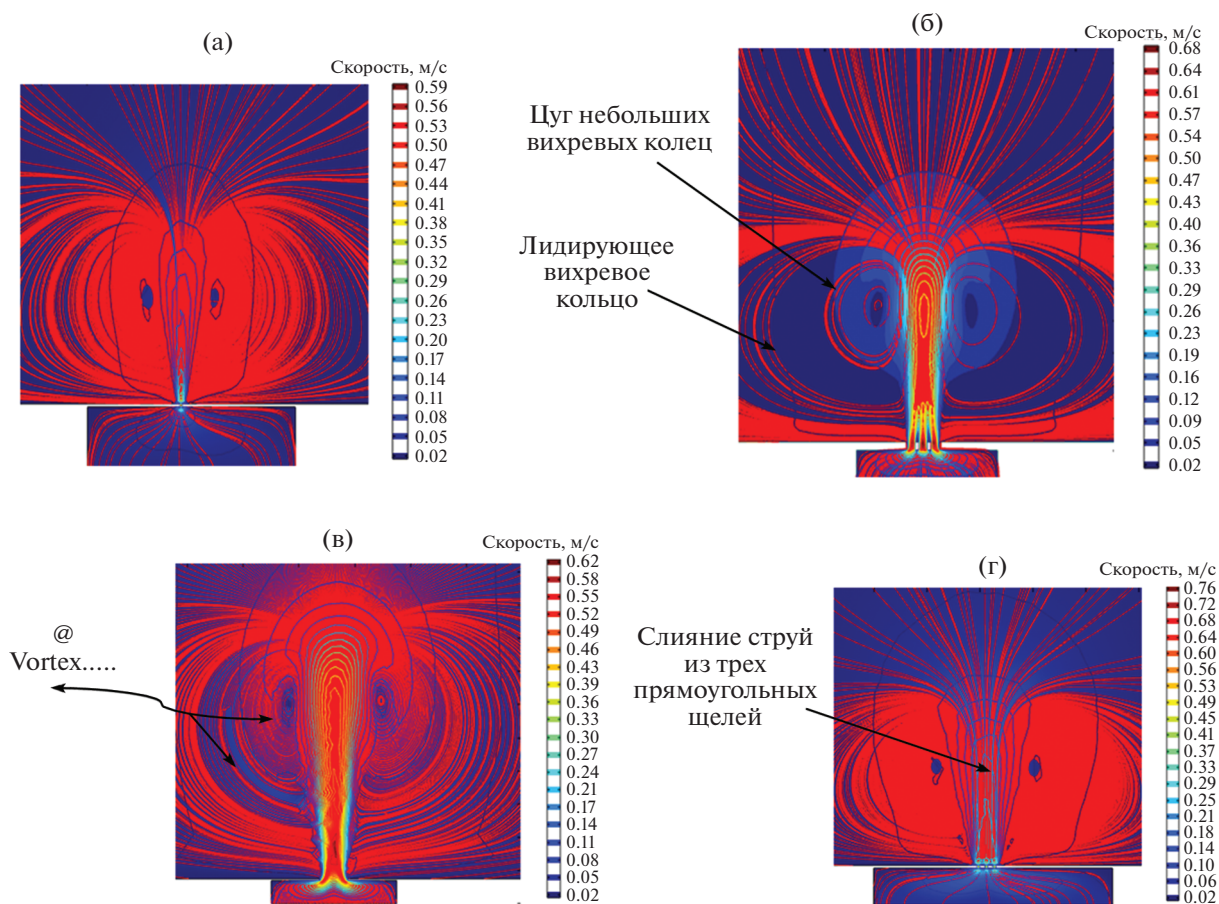


Рис. 5. (в цвете онлайн) Поверхностный контур профиля скорости: (а) синтетический струйный актуатор с одним круглым отверстием ($Re = 120$ и $S_r = 0.05$); (б) синтетический струйный актуатор с тремя круглыми отверстиями ($Re = 137$ и $S_r = 0.044$); (в) синтетический струйный актуатор с одной прямоугольной щелью ($Re = 145$ и $S_r = 0.07$); (г) синтетический струйный актуатор с тремя прямоугольными щелями, работающий на частоте $f = 10$ Hz и при напряжении возбуждения $V_{\text{exc}} = 300$ вольт в момент времени $t = 5T/16$ ($Re = 59$ и $S_r = 0.10$).

скорость больше по сравнению с тремя круглыми отверстиями из-за быстро растущего двойного вихря по обе стороны синтетического струйного актуатора с прямоугольными щелями.

На рис. 7а изображена средняя скорость по центральной линии для амплитуды максимального смещения на резонансной частоте диафрагмы. Из этой фигуры видно, что в том случае, когда диафрагма колеблется с частотой, отличной от резонансной частоты или частоты Гельгольца для полости, диафрагма движется настолько медленно, что энергии в полости недостаточно для эжекции из нее жидкости. Когда частота возбуждения равна частоте Гельгольца f_H , объем жидкости, перемещаемой мембраной, становится равным объему жидкости, выбрасываемой из отверстия, тем самым улучшая характеристики синтетического струйного актуатора. Это увеличивает скорость с 0.3 до 0.6 м/с.

На рис. 7б и 7в изображены распределения температуры при постоянном потоке тепла (1000 Вт/м^2) на поверхности нагретой фольги при падении синтетических струй из одиночного круглого отверстия и одиночной прямоугольной щели при частоте возбуждения 10 Гц. Из рис. 7б видно, что хорошее охлаждение достигается в центральной части нагретой фольги. Это происходит из-за того, что струя падает непосредственно на нагретую поверхность. Площадь охлаждения больше по сравнению с одиночным круглым отверстием, что указывает на то, что теплоперенос более эффективен для одиночной прямоугольной щели. На рис. 8а и 8б изображены зависимости коэффициента конвективной теплопередачи с различным отношением размеров отверстия — нагреватель (Z/b) для одиночной прямоугольной щели и различных отношений Z/d для синтетической струи с одиночным круглым отверстием, работающей на частоте 10 Гц. Для одиночной прямоугольной щели максимальный теплоперенос происходит, когда поверхность, на которую

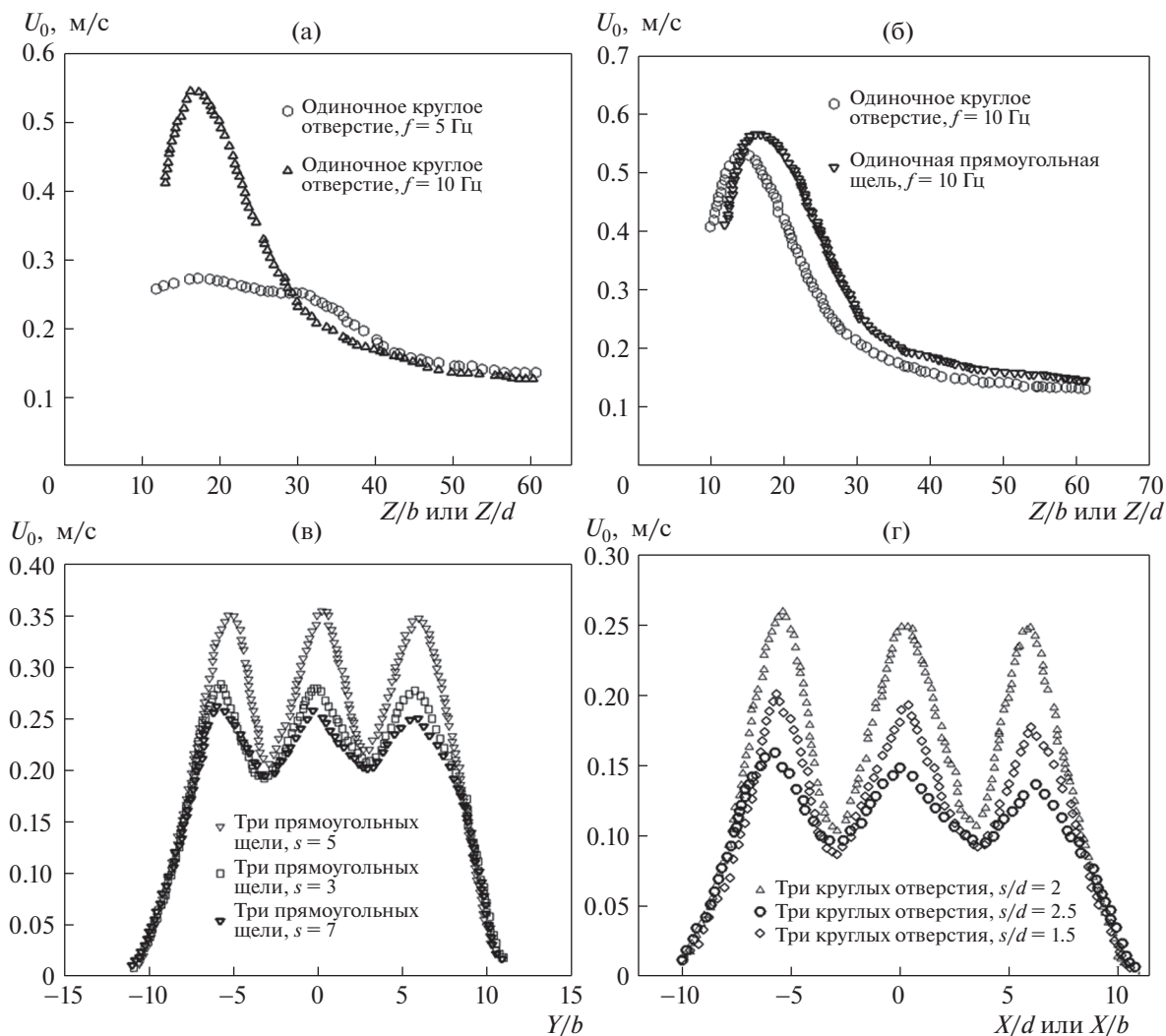


Рис. 6. Сравнение профилей скорости как функции расстояния по оси на центральной линии: (а) синтетический струйный актуатор с одной прямоугольной щелью, работающий на частоте $f = 5$ Гц; (б) синтетический струйный актуатор с одной прямоугольной щелью и одним круглым отверстием на частоте $f = 10$ Гц. Радиальные профили скорости как функции радиуса: (в) синтетический струйный актуатор с тремя прямоугольными щелями, (г) синтетический струйный актуатор с тремя круглыми отверстиями при разных отношениях шагов (s/b или s/d), работающий на частоте $f = 10$ Гц и напряжении возбуждения 300 вольт.

падает струя, находится на расстоянии 40 мм от среза отверстия, что дает оптимальное отношение размеров отверстие-нагреватель (Z/b), равное 80. Максимальное значение коэффициента теплопередачи, соответствующее $Z/b = 80$, равно $112.5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ для одиночной прямоугольной щели. Это примерно на 17.5% больше по сравнению со значением, соответствующим $Z/d = 14$ для одиночного круглого отверстия. Из рисунка также видно, что область охлаждения с большим коэффициентом теплопередачи при падении синтетической струи из одиночной прямоугольной щели шире, чем в случае падения струи из одиночного круглого отверстия.

Влияние взаимного расположения отверстий на коэффициент теплопередачи для случаев трех прямоугольных щелевых отверстий и трех круглых отверстий проиллюстрировано на рис. 9а и 9б. Как видно из рис. 9а, для синтетической струи с тремя прямоугольными щелевыми отверстиями максимальный коэффициент теплопередачи при $s/b = 5$ примерно на 15% больше по сравнению с коэффициентом теплопередачи для синтетической струи с одной щелью. Из рис. 9б можно видеть, что для струи из трех круглых отверстий, установленных с наклоном, при $s/d = 5$ теплоперенос возрастает на 5%.

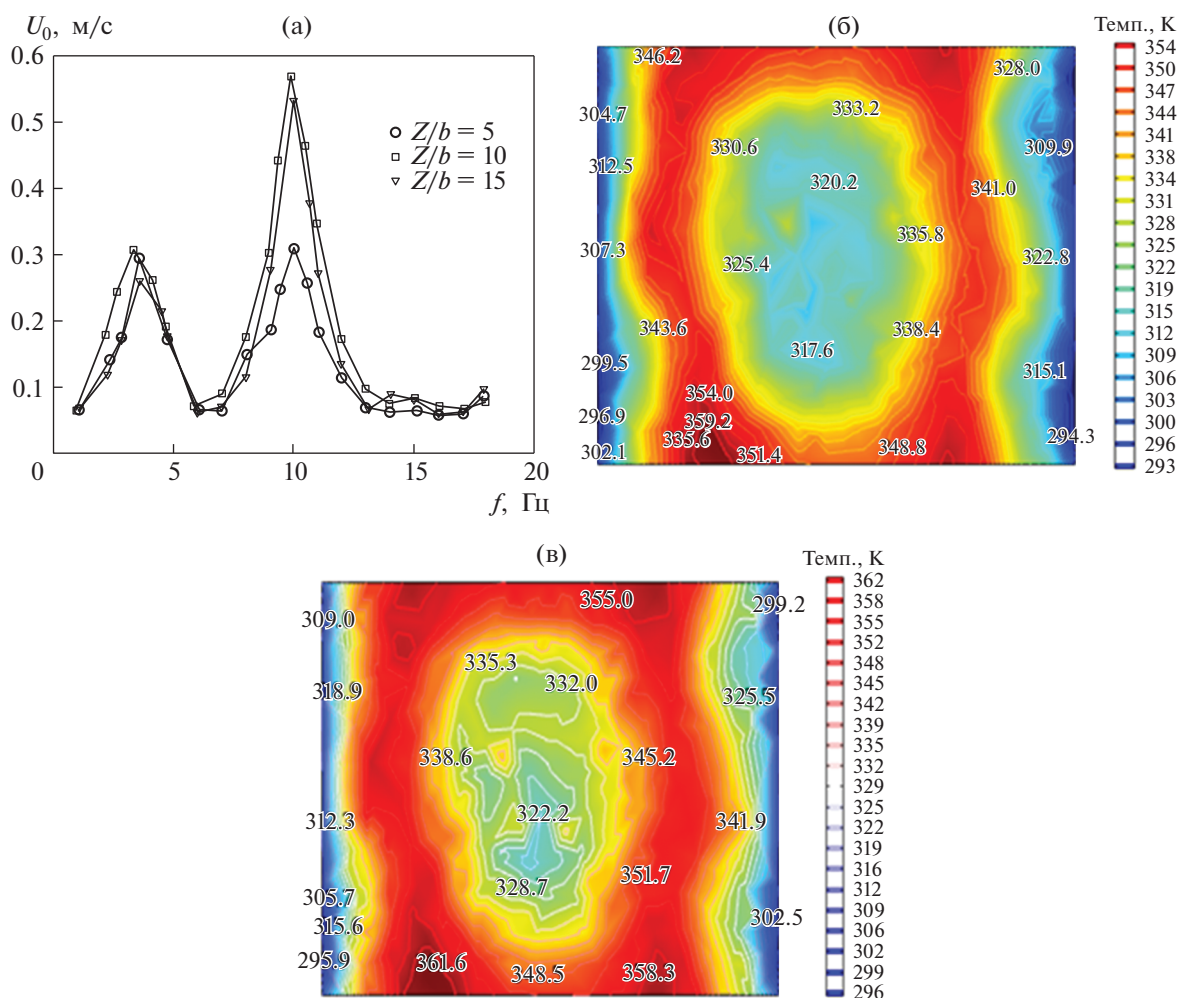


Рис. 7. (в цвете онлайн) (а) Средняя скорость по центральной линии в синтетическом струйном актуаторе с одной прямоугольной щелью при разных частотах возбуждения и напряжении возбуждения 300 вольт; (б) распределение температуры на нагретой пластине, моделированное после падения струи: (а) синтетическая струя с одной прямоугольной щелью при $Z/d = 80$, $q'' = 1000$ Вт/м², и $f = 10$ Гц; синтетический струйный актуатор с одним круглым отверстием $Z/b = 14$, $q'' = 1000$ Вт/м², и $f = 10$ Гц.

Распределения средних коэффициентов теплопередачи для разных типов геометрии отверстий синтетических струй представлены на рис. 10а и 10б. Для каждого отверстия мембрана возбуждается с частотой 10 Гц и поверхность мишени расположена на оптимальном расстоянии по отношению к отверстию. Видно, что для одного щелевого отверстия средний коэффициент теплопередачи больше по сравнению со средним коэффициентом теплопередачи для случая одного круглого отверстия. Максимальный коэффициент теплопередачи равен 83.5 Вт/м²К в случае одного отверстия в виде прямоугольной щели, что на 12% больше по сравнению с единственным круглым отверстием. Это доказывает, что в случае одного отверстия в виде прямоугольной щели синтетическая струя обеспечивает лучшую теплопередачу, чем одиночное круглое отверстие. Кроме того, относительное расположение отверстия и мишени оказывает существенное влияние на эффективный коэффициент полезного действия в случае одного отверстия в синтетическом струйном актуаторе. При наличии нескольких отверстий в виде прямоугольных щелей коэффициент теплопередачи уменьшается примерно на величину от 24% до 28% по отношению к одной прямоугольной щели при изменении s/b от 3 до 7 соответственно. В случае трех круглых отверстий коэффициент теплопередачи уменьшается на 7% и до 28% по отношению к одному круглому отверстию при изменении s/b от 1.5 до 2.5 соответственно. Коэффициент теплопередачи максимален при $s/b = 5$ для трех прямоугольных щелей и при $s/d = 2$ для трех круглых отверстий. Настоящие результаты расчетов находятся в хорошем согласии с данными экспериментов

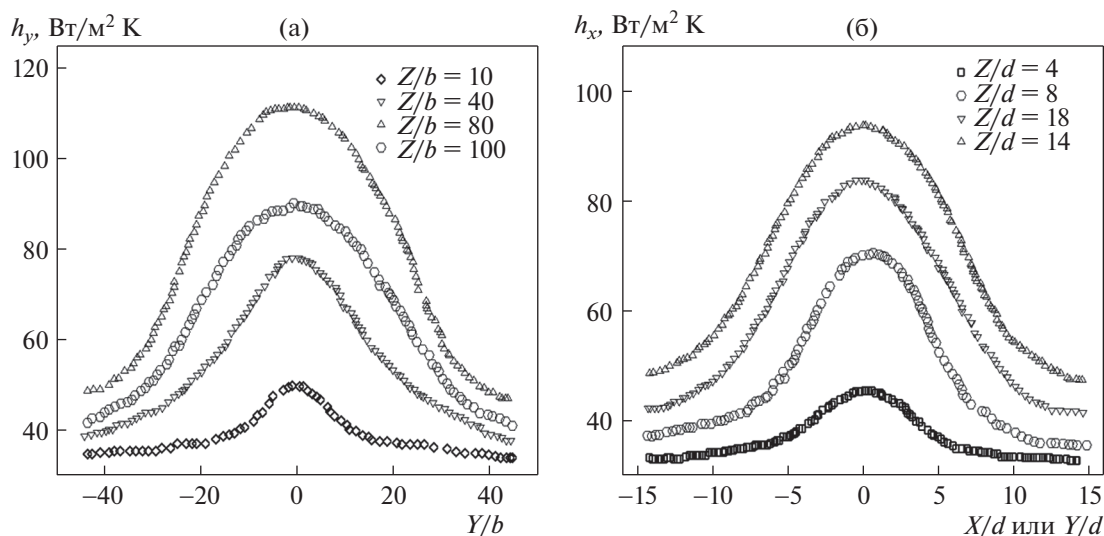


Рис. 8. Коэффициент теплопередачи при падении синтетической струи: (а) при наличии единственной прямоугольной щели и (б) синтетический струйный актуатор с одним круглым отверстием при частоте возбуждения $f = 10$ Гц и напряжении возбуждения 300 вольт

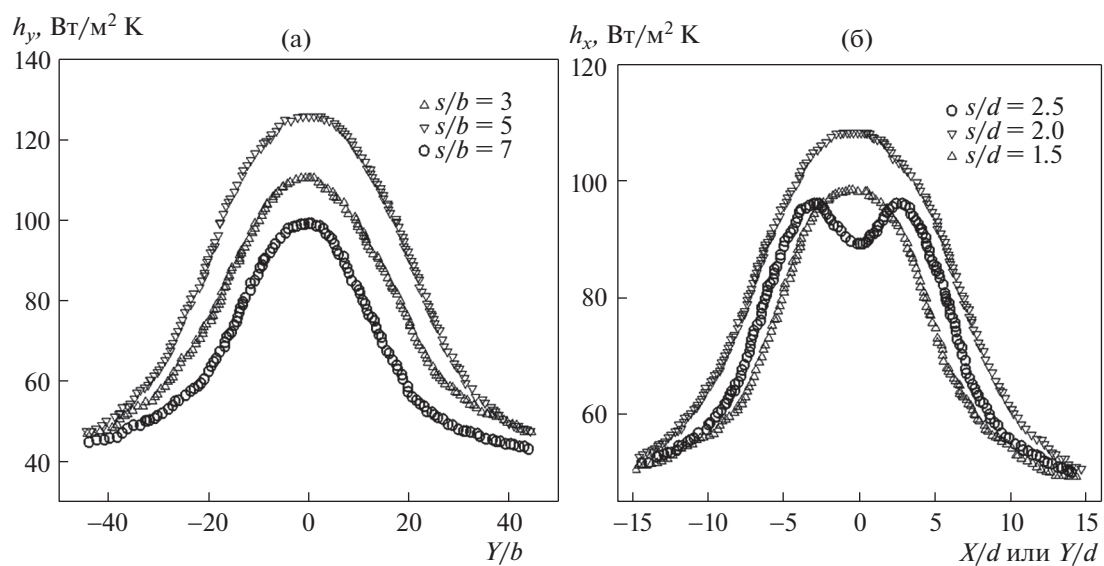


Рис. 9. Коэффициент теплопередачи из-за падении синтетической струи при различных отношениях шагов: (а) при наличии трех прямоугольных щелей и (б) синтетический струйный актуатор с тремя круглыми отверстиями при частоте $f = 10$ Гц и напряжении возбуждения 300 вольт

[28], проведенных на синтетических струях, работающих на частоте 1000 Гц, с одним круглым отверстием и одной щелью с постоянной площадью 5.0 мм^2 на срезе отверстия.

4. ВЫВОДЫ

Проведено детальное численное исследование влияния отверстия на оптимальную частоту возбуждения одиночной полости, имеющей отверстия разного вида, такие как одна прямоугольная щель, одно круглое отверстие, три прямоугольных щели и три круглых отверстия. Подводя итоги, можно отметить следующие важные результаты:

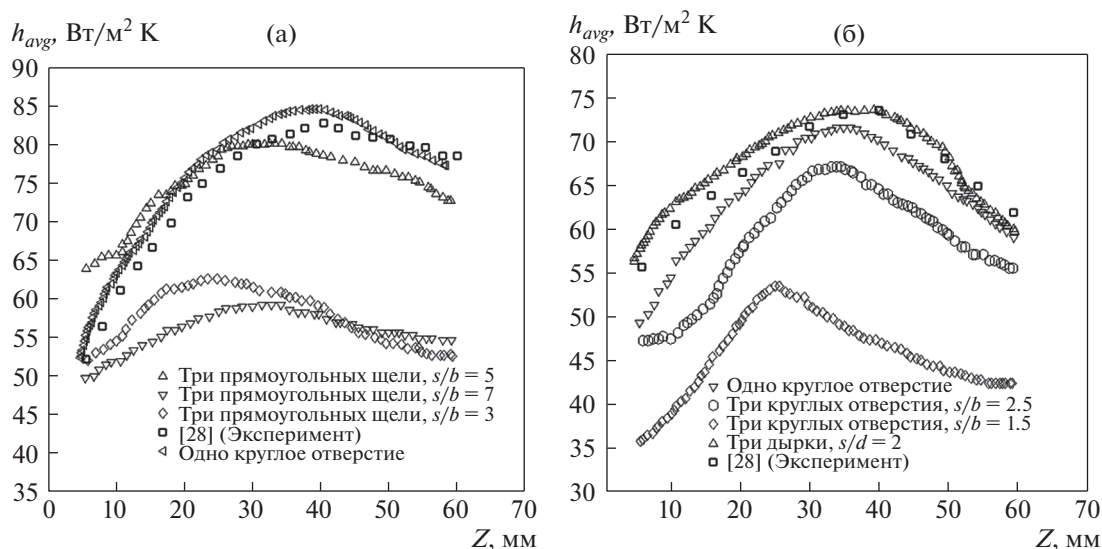


Рис. 10. Распределения среднего коэффициента теплопередачи для различных типов геометрий отверстий синтетической струи, проверенных на достоверность в [28]; (а) отверстие типа прямоугольной щели; (б) отверстие типа цилиндрической дырки

(1) Скорость синтетической струи из пьезоэлектрического актуатора достигает максимума, когда актуатор работает на оптимальной частоте. Для синтетической струи из одного круглого отверстия оптимальная частота приблизительно та же, как и в случае одиночного прямоугольного щелевого отверстия при заданной площади отверстия. При наличии нескольких отверстий оптимальная частота меньше, чем в случае синтетической струи из единственного отверстия.

(2) Синтетическая струя, сформированная при истечении из одночного прямоугольного щелевого отверстия, производит более сильное увлечение жидкости и обеспечивает более интенсивное проникновение по сравнению с одиночным круглым отверстием, и, таким образом, демонстрирует лучшие эксплуатационные характеристики.

(3) В случае многих синтетических струй отдельные струи быстро размываются и сливаются, образуя объединенную центральную струю, имеющую больший импульс.

(4) В случае синтетических струй из многих отверстий для конфигурации с объединенной центральной струей средняя скорость струи меньше по сравнению со средней скоростью из актуатора с одной струей. Кроме того, радиальная скорость из синтетического струйного актуатора с тремя прямоугольными щелями больше по сравнению с синтетической струей из трех круглых отверстий из-за быстро растущего двойного вихря по обе стороны синтетического струйного актуатора с прямоугольными щелями.

(5) При задании объема полости актуатора наибольшая теплопередача наблюдается при $s/b = 5$ и $s/d = 2$ в случае синтетического струйного актуатора с тремя прямоугольными щелями и тремя круглыми отверстиями соответственно.

(6) Расстояние от отверстия до нагревателя имеет большее влияние на синтетический струйный актуатор для одиночной прямоугольной щели и круглого отверстия в случае малого расстояния. Для синтетического струйного актуатора с тремя круглыми отверстиями коэффициент теплопередачи на 2.8% больше, чем для синтетического струйного актуатора с одним отверстием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smith B.L., Glezer A. The formation and evolution of synthetic jets // J. Phys. Fluids. 1998. V. 10. P. 2281.
2. Rusovici R., Offord C., Phelps C. A coupled field finite element modeling procedure for design of a synthetic-jet actuators // J. Intellig. Mater. Syst. Structure. 2011. V. 22. P. 161.
3. Gad-el-Hak M. The MEMS Handbook. Boca Raton: CRC Press, 2011.
4. Ingard U., Labate S. Acoustic circulation effects and the nonlinear impedance of orifices // J. Acoustic Soc. Am. 1950. V. 22. P. 211.
5. Dauphinee T.M. Acoustic air pump // Rev. Sci. Instrum. 1957. V. 28. P. 456.

6. *Cater J.E., Soria J.* The evaluation of round zero-net-mass-flux jets // *J. Fluid Mech.* 2002. V. 472. P. 167.
7. *Utturkar Y., Holman R., Mittal R., Carroll B., Sheplak M., Cattafesta L.* A jet formation criteria for synthetic jet actuators // 41th Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2003. AIAA Paper 2003-0636.
8. *Holman R., Utturkar Y., Mittal R., Smith B.L., Cattafesta L.* Formation criterion for synthetic jets // *J. AIAA.* 2005. V. 43. P. 2110.
9. *Agrawal A., Verma G.* Similarity analysis of planar and axisymmetric turbulent synthetic jets // *J. Heat and Mass Transfer.* 2008. V. 51. P. 6194.
10. *Chaudhar M., Puranik B., Agrawal A.* Heat transfer characteristics of synthetic jet impingement cooling // *J. Heat and Mass Transfer.* 2010. V. 53. P. 1057.
11. *Qayoum A., Gupta V., Panigrahi P.K., Muralidhar K.* Influence of amplitude and frequency modulation on flow created by a synthetic jet actuator // *Sensors Actuators. A. Phys.* 2010. V. 162. P. 36.
12. *Qayoum A., Gupta V., Panigrahi P.K., Muralidhar K.* Perturbation of laminar boundary layer by synthetic jet for heat transfer enhancement // *J. Heat and Mass Transfer.* 2010. V. 53. P. 5035.
13. *Mallinson G., Hong G., Reizes J.A.* Some characteristics of synthetic jets // *30th Fluid Dynamics Conference, AIAA, Norfolk, VA*, 1999. AIAA Paper № 1999–3651. P. 99.
14. *Gallas Q., Holman R., Nishida.* Lumped element modeling of piezoelectric-driven synthetic jet actuators // *J. AIAA.* 2003. V. 41. P. 240.
15. *Gallas Q., Wang G., Papila M.* Optimisation of synthetic jet actuators // 41th Aerospace Science Meeting and Exhibit. AIAA Paper 2003–0635, 2003.
16. *Chaudhari M.B., Puranik B., Agrawal A.* Multiple orifice synthetic jet for improvement in impingement heat transfer // *J. Heat and Mass Transfer.* 2011. V. 54. P. 2056.
17. *Silva-Llanca L., Ortega A., Rose I.* Experimental convective heat transfer in a geometrically large two-dimensional impinging synthetic jet // *J. Heat and Mass Transfer.* 2015. V. 90. P. 339.
18. *He X., Lustbader J., Arik M., Sharma R.* Heat transfer characteristics of impinging steady and synthetic jets over vertical at surface // *J. Heat and Mass Transfer.* 2015. V. 80. P. 825.
19. *Qayoum A., Panigrahi P.K.* Synthetic jet interaction with approaching turbulent boundary layer for heat transfer enhancement // *J. Heat Transfer Engineering.* 2015. V. 36. P. 352.
20. *Mane P., Mossi K., Castro N., Bryant R.* Boundary condition effects on piezo-synthetic jets // *Integrated Ferroelectrics.* 2005. V. 71. P. 257.
21. *Любимов Д.А., Потехина И.В.* Применение RANS/ILES-метода для анализа эффективности управления отрывными течениями в диффузорах с помощью синтетических струй // *Изв. РАН. МЖГ.* 2015. № 4. С. 144–154.
22. *Kartushinsky A.I., Michaelides E.E., Rudi Y.A., Tisler S.V., Shcheglov I.N.* Numerical simulation of three-dimensional gas-solid particle flow in a horizontal pipe // *AIChE J.* 2011. V. 57. № 11. P. 2977–2988.
23. *Crispo C.M., Greco C.S., Avallone F., Cardone G.* On the flow organization of a chevron synthetic jet // *J. Exp. Thermal and Fluid Science.* 2017. V. 82. P. 136.
24. *Yuan-wei L., Jing-zhou Z., Yong S., Xiao-ming T.* Numerical investigation for effects of actuator parameters and excitation frequencies on synthetic jet fluidic characteristics // *Sensors and Actuators. A: Physical.* 2014. V. 219. P. 100.
25. *Jain M., Puranik B., Agrawal A.* A numerical investigation of effects of cavity and orifice parameters on the characteristics of a synthetic jet flow // *Sensors and Actuators. A: Physical.* 2014. V. 165. P. 351.
26. *Mane P., Mossi K., Rostami A., Bryant R., Castro N.* Piezoelectric actuators as synthetic jet: cavity dimension effects // *J. Intelligent Mater. Syst. Struct.* 2007. V. 18. P. 1175.
27. *Mossi K.M., Bishop R.P.* Characterization of different types of high performance THUNDERTM Actuators // *Proc. Symp. on Smart Structure Materials.* 1999. V. 3675 (Smart Material Technology, Newport Beach, CA, United States).
28. *Zhang J.Z., Tan X.M.* Experimental study on flow and heat transfer characteristics of synthetic jet driven by piezoelectric actuator // *J. Experimental Fluid and Thermal Sciences.* 2012. V. 48. P. 221.