

Приборы и оборудование

УДК 532.517

Коваленко Г.В., канд. техн. наук**Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев***ул. Желябова, 2а, 03057 Киев, Украина, e-mail: gkliashkova5@gmail.com*

Особенности аэродинамики теплообменных поверхностей с цилиндрическими лунками

Рассмотрены вопросы гидродинамики около теплообменных поверхностей, сформированных цилиндрическими лунками различной глубины. Известно, что в некотором диапазоне скоростей при обтекании таких поверхностей нарушается аналогия Рейнольдса и приращение теплообмена после структурирования поверхности лунками превышает увеличение гидравлического сопротивления. Одной из причин этого явления есть образование в углублениях вихревых структур с характерными для них осцилляциями. В работе экспериментально определены зависимости чисел Струхалия и коэффициентов гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса при обтекании цилиндрических лунок различной глубины. Исследуемые лунки располагались в канале с входом, выполненном по форме сопла Витошинского. Сама лунка представляла собой трубку, изготовленную из пьезокерамики, на поверхности которой напылением были выполнены 4 датчика давления в носовой, кормовой и боковых областях. Подвижный поршень внутри трубки мог занимать различные фиксированные положения, позволяя образовывать лунки различной глубины, без изменения остальных конструктивных особенностей. Поток до лунки был ламинарный. Диапазон чисел Рейнольдса (рассчитанных по диаметру лунки) составлял от 8000 до 21000 и охватывал область существования в лунке подковообразного и столбообразного вихрей. Получено качественное соответствие опытных данных с результатами предшественников. Максимум гидравлического сопротивления канала с лункой наблюдался при относительной глубине лунки 0,5. Подтверждено возникновение колебаний с частотами, которые могут быть связаны с ударом потока о кормовую часть лунки, вращением вихря в углублении и выбросами вещества из углубления. Показано, что подключение к донной части лунок небольшой дополнительной емкости может привести к заметному демпфированию колебаний и существенному (более чем в 2 раза) уменьшению гидравлического сопротивления канала. Полученные данные могут быть использованы при проектировании поверхностей теплообмена с интенсификацией теплоотдачи. *Библ. 22, рис. 5.*

Ключевые слова: теплообменные поверхности, цилиндрические лунки, пульсации давления, гидравлическое сопротивление, число Струхалия, число Рейнольдса.

Введение

Волновые возмущения перспективны для снижения гидроакустического шума, уменьшения гидродинамического сопротивления, интенсификации тепло- и массообмена. Одним из способов получения колебаний нужной частоты и амплитуды является обтекание поверхностей с углублениями. Такие поверхности встречаются в летательных аппаратах, подводных и надводных судах, теплообменниках. В некотором диапазоне скоростей при обтекании теплообменных поверхностей с углублениями нарушается аналогия Рейнольдса, и приращение теплообмена после формирования поверхности лунками превышает увеличение гидравлического сопротивления.

При обтекании потоком тел с углублениями возникают колебания, частота которых зависит от размеров, формы углубления, скорости звука и скорости потока. При наличии полости, способной быть резонатором, на образование вихрей влияют колебания резонатора, и вся система может рассматриваться как автоколебательная и нелинейная. Математическое моделирование подобных систем представляет собой сложную проблему.

Течениям у поверхностей с углублениями посвящено много работ, в которых рассмотрено большое разнообразие форм обтекаемых тел, условий возникновения различных типов вихрей, их взаимодействия со стенкой и между собой [1–7]. В то же время остаются не до конца изученными проблемы взаимодействия волн со сдвиговыми течениями. Актуальным остается создание базы данных относительно характеристик полей скорости и давления внутри углублений и в их окрестностях.

Характеристика проблемы

В самом цилиндрическом углублении, как и в углублении, имеющем форму сферического сегмента [1], наблюдаются следующие картины течения. При малых скоростях течение носит безотрывный диффузорно-конфузорный характер (N). Линии тока, проходящие рядом с углублением, искривляются в сторону углубления.

При увеличении скорости потока у входной кромки углубления поток отрывается, а в углублении образуется подковообразный вихрь, концы которого опираются на боковые стенки углубления с двух сторон плоскости симметрии углубления. В проекции на плоскость стенки, на которой образовано углубление, видна пара симметричных вихрей (HS). Пограничный слой над углублением периодически сворачивается, от-

рывается и превращается в дорожку Кармана, при увеличении скорости частота срыва вихрей возрастает.

При еще большей скорости один из концов подковообразного вихря поднимается над углублением, превращаясь в столбообразный (R). Верхняя его часть сносится потоком по течению. Положение вихря неустойчиво, и его нижний конец может перескакивать из левой части углубления в правую и наоборот. Помимо сравнительно медленных перемещений из одной половины углубления в другую, вихрь колеблется с высокой частотой поперечно к своей продольной оси. Слой над углублением с частью столбообразного вихря отрывается и образует вихревую дорожку.

В настоящей работе исследовалось обтекание цилиндрических лунок различной глубины, когда в них наблюдались режимы подковообразного (HS) и столбообразного (R) вихрей. При этом в общих чертах картина обтекания углубления следующая [2]. Из-за резкого изменения геометрии обтекаемой поверхности при достаточно большой скорости поток на переднем крае лунки отрывается и образует сдвиговый слой. Скорость в этом слое со стороны лунки меньше, чем со стороны основного потока. Поэтому на некотором расстоянии от места отрыва в сдвиговом слое начинают образовываться повторяющиеся вихревые структуры, уходящие в основной поток. Вследствие разности скоростей по обе стороны сдвигового слоя он отклоняется в сторону лунки, и часть его ударяется о ее заднюю (кормовую) стенку. Место удара является источником звуковых колебаний. Если частота какой-либо гармоники этих колебаний совпадает с частотой схода вихревых структур сдвигового слоя, эти два явления начинают усиливать друг друга [3, 4].

Осцилляции потока внутри и вблизи углубления разделяют на следующие классы [5]:

1) гидродинамические колебания, возникающие вследствие неустойчивости сдвигового слоя. Они могут усиливаться, взаимодействуя с вихревыми системами, формирующимися внутри углубления и производящими выбросы в пограничный слой;

2) осцилляции, вызванные взаимодействием стоячих волн давления в углублении и акустических волн, излучаемых от мест резкого изменения профиля поверхности (например, ближайшим к потоку краем задней стенки углубления) [3];

3) осцилляции, связанные с гидроупругостью, когда колебания твердых границ индуцируются вихрями, взаимодействующими между собой и с твердой поверхностью [4].

При низких частотах звук, генерируемый углублением, распространяется во всех направлениях, но с повышением частоты акустическое излучение приобретает дипольный характер [6].

Звуковое давление, излучаемое впадинами, уменьшается с ростом толщины пограничного слоя потока [7].

Предпринято несколько попыток получить математическое предсказание частоты колебаний, инициированных потоком, проходящим над углублением, с теми или иными упрощающими предположениями.

Известно решение для простого гармонического осциллятора Гельмгольца [3]. Собственная частота резонатора ω зависит от скорости звука c в среде, заполняющей резонатор, его объема V , площади горла резонатора s , его эффективной длины L :

$$\omega = c (s/LV)^{1/2}. \quad (1)$$

Эффективная длина горла резонатора:

$$L = l + d \pi/4, \quad (2)$$

где l — длина горла резонатора; d — диаметр резонатора.

В предположении, что полусферическая лунка или цилиндрическая лунка, глубина которой равна радиусу цилиндра, представляют собой резонаторы Гельмгольца с широким горлом и соответствующим объемом, частоты колебаний f при постоянной температуре воздуха будут зависеть только от диаметров углублений d .

Для полусферы

$$f_s = 106,43/d. \quad (3)$$

Для цилиндрической лунки с отношением глубины k диаметру $h/d = 0,5$

$$f_c = 86,9/d. \quad (4)$$

Зависимости чисел Струхала от числа Рейнольдса для таких резонаторов будут обратно пропорциональны скорости потока (рис.1, линии 1, 2). В углублениях, перспективных для интенсификации теплообмена, управления отрывом потока, улучшения смешения и других приложений, отношение глубины лунки к ее диаметру не превышает 0,5. Как видно, колебания, соответствующие работе таких лунок как резонаторов Гельмгольца, являются высокочастотными и представляют малый интерес для практического использования.

Для большинства практических задач актуальны низкочастотные колебания, связанные с

возникновением в углублении вихревых структур. При достаточно большой скорости ($Re_h > 120$) поток, обтекающий лунку, не присоединяется ко дну углубления [8]. После удара о заднюю стенку углубления часть потока поворачивает в лунку, образуя сравнительно устойчивую вихревую структуру. У передней стенки лунки может образовываться рециркуляционная зона. Скорость на внешней границе пограничного слоя этой структуры U_c постоянна и $U_c = 0,4 U$, где U — скорость в ядре потока [9]. Период выбросов вещества из углубления можно оценить, рассчитывая время, необходимое для прохождения порциями газа всех участков траектории движения с учетом того, что над лункой скорость потока — U , а во внутренней части — U_c . Если, пренебрегая наличием рециркуляционной зоны, предположить, что вихревая структура занимает всю лунку, число Струхала ($Sh = f d/U$) для полусферической лунки будет $Sh = 0,203$, а для цилиндрической с отношением глубины k

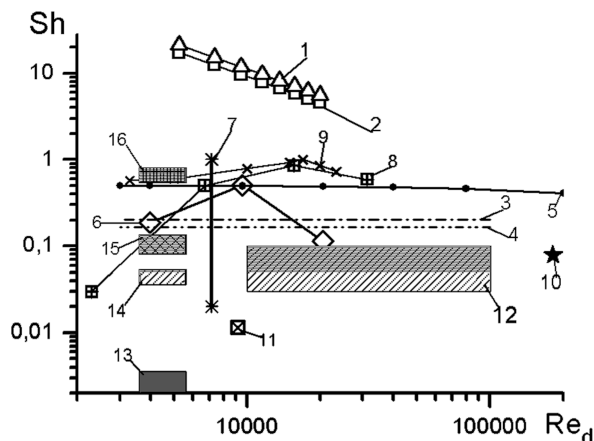


Рис.1. Зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса при обтекании углублений, по данным различных исследователей: 1 — для полусферических углублений (по зависимости (3)); 2 — для цилиндрических углублений с $h/d = 0,5$ (по зависимости (4)); 3 — для полусферической лунки (в соответствии с [9]); 4 — для цилиндрической лунки с $h/d = 0,5$ (в соответствии с [9]); 5 — по формуле (5) Росчитера [10]; 6 — эксперименты с полусферическими углублениями [11]; 7 — граница существования подковообразного вихря в полусферической лунке [1]; 8 — компьютерное моделирование обтекания пластины с полуцилиндрическим углублением [13]; 9 — эксперименты с углублениями в виде сферических сегментов с $h/d = 0,1$ [14]; 10 — эксперименты с полусферическим углублением [15]; 11 — низкочастотные колебания в экспериментах с углублением в виде сферического сегмента с $h/d = 0,26$ [16]; 12 — эксперименты с углублениями в виде сферических сегментов с $h/d = 0,3-0,5$ [17]; 13 — колебания, вызванные выбросами вещества из углубления [18]; 14 — колебания сдвигового слоя над углублением [18]; 15 — колебания, обусловленные вращением вихря в углублении [18]; 16 — колебания, возникающие при ударе потока о кормовую стенку углубления [18].

диаметру $h/d = 0,5$ будет $Sh = 0,166$. Эти значения отмечены линиями 3 и 4 на рис.1.

Еще одну оценку частоты пульсаций потока в цилиндрическом углублении можно сделать по формуле Росситера [10]:

$$f = m U / [d (M + U/c_1)], \quad (5)$$

где m — номер моды колебаний; M — число Маха. (Скорость волны, распространяющейся вперед c_1 , равна приблизительно половине скорости набегающего потока U .)

При отношении глубины лунки к ее диаметру $h/d = 0,5$ число Струхала в исследованном интервале чисел Рейнольдса $3000 < Re_d < 200000$ находится в диапазоне $0,50 < Sh < 0,41$ (линия 5 с круглыми точками на рис.1).

Немонотонную зависимость от числа Рейнольдса показывают числа Струхала, определенные по результатам экспериментов [11] (линия 6 с ромбами на рис.1). Возможно, это связано с переходом от режима подковообразного вихря к столбообразному. В области существования в лунке подковообразного вихря [1] с увеличением чисел Рейнольдса значения Sh растут (левее границы 7 с четырехугольными звездами), а в зоне наличия столбообразного вихря убывают. При переходе в область столбообразного вихря наряду с основными колебаниями возникают высокочастотные и низкочастотные моды. Все первые моды колебаний не удовлетворяют критерию устойчивости сдвигового слоя из [12]:

$$f \delta 4\pi / U < 1. \quad (6)$$

Компьютерное моделирование течения над полуцилиндрической лункой [13] (рис.1, линия 8) показывает качественное соответствие с экспериментами [11] несмотря на различие геометрии углублений.

Подобная немонотонная зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса получена и для мелких углублений в виде сферических сегментов. В этих экспериментах фиксировались выбросы вещества из углубления с отношением глубины к диаметру $h/d = 0,1$ [14] (рис.1, линия 9). Положение максимума, как и следовало ожидать для мелких лунок, сдвинуто в сторону больших чисел Рейнольдса по сравнению с зависимостью для полусферических углублений, а сами значения чисел Струхала превосходят соответствующие для полусферических лунок в 1,1–3 раза.

Значительно разнятся значения чисел Струхала в исследованиях течений около полуцилиндрических лунок в работах Кесарева и Коз-

лова [15] (рис.1, точка 10), с одной стороны, и Терехова В. И. с сотрудниками [16] — с другой (рис.1, точка 11).

Во многих экспериментах фиксировались только те частоты, которые характеризовались максимальной энергией колебаний. К сожалению, без детализации очерчена область частот при обтекании лунок, выполненных в виде сферических сегментов с отношением глубины к диаметру $h/d = 0,3–0,5$ [17] (рис.1, область 12).

Возможность объяснения приведенного разномоя показана в работе [18], где с помощью визуализации проведено деление колебаний на диапазоны с выяснением предполагаемых причин их возникновения. Наиболее низкочастотными являются колебания, вызванные выбросами вещества из углубления (рис.1, область 13). Подобные частоты наблюдаются в дорожке вихрей, напоминающей дорожку Кармана (рис.1, область точки 11) [16]. Колебания сдвигового слоя над лункой (рис.1, область 14) коррелируют с результатами Кикнадзе и др. Колебания, связанные свращением вихря в углублении (рис.1, область 15), находятся в соответствии с экспериментами Кесарева и Козлова [15], а также немного отличаются от приближенных оценок (рис.1, линия 3). Высокие частоты (рис.1, область 16) объясняются как результат удара о кормовую стенку лунки.

Энергия перечисленных осцилляций различна и может меняться при изменении скорости потока.

Цель настоящей работы — экспериментальное изучение гидродинамических особенностей вихреобразования внутри одиночных цилиндрических лунок различной глубины, а также влияние этих лунок на гидравлическое сопротивление участка канала, их содержащего.

Экспериментальная установка и методика исследований

Для измерения частот пульсаций, возникающих при обтекании цилиндрических лунок различной глубины, создан экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис.2.

В нем была предусмотрена возможность изменять глубину лунки при сохранении всех остальных параметров. Цилиндрическая стенка лунки 2 была изготовлена из пьезокерамической трубки, внутренняя и наружная стороны которой были покрыты восемью серебряными обкладками, позволяющими регистрировать колебания стенки лунки в кормовой, носовой и боковых частях. Дно лунки 3, выполненное в виде поршня, имело возможность перемещаться и фиксироваться в выбранном положении, обеспечивая нужную глубину лунки h . Было преду-

смотрено использование поршня с осевым отверстием, соединяющим полость лунки с небольшим упругим объемом (демпфером) 18, или осевым отверстием, закрытым пробкой 17. Входом в рабочий участок 1 служило сопло Витошинского, приближавшего профиль скорости на входе в рабочий участок к П-образному. Выход из рабочего участка 5 был выполнен в виде канала с узкими клинообразными боковыми вырезами, уменьшавшими интенсивность звуковых колебаний при истечении в большой объем концевое устройство 6.

Концевое устройство 6 было изготовлено в виде неплотного обратного клапана. Он представляет собой цилиндрическую камеру с центральным входом и тангенциальным выходом. Обладая существенно различающимися гидравлическими сопротивлениями для потоков с прямым и обратным направлениями, такая камера подавляет колебания, которые могут возникать в тракте. В донной части концевое устройство была предусмотрена возможность подсоединения «удлинителя» — заглушенного на конце участка трубы, длина которого равнялась длине исходного рабочего участка 23. Нагнетатель 11 был присоединен к рабочему участку через глушитель 9, выполненный в виде ящика с разнесенными входом и выходом. На стенке глушителя устанавливались клапаны 10, открытием которых можно было уменьшать расход через рабочий участок. Внутренние поверхности глушителя и неплотного обратного клапана были выстелены поролоном для уменьшения их отражательных свойств.

Эксперименты проводились следующим образом. Поршень 3 устанавливался и фиксировался в положении, соответствующем одному из выбранных значений отношения глубины лунки к диаметру h/d , равному 0,1; 0,2215; 0,3418; 0,5 или 0,7532. (Диаметр лунки $d = 15,8$ мм был постоянным.) Лунка располагалась на расстоянии 177 мм от входа в рабочий участок. Нагнетатель 11, работающий на всасывание, прокачивал воздух из помещения с фиксированной температурой t_0 и давлением P_0 через

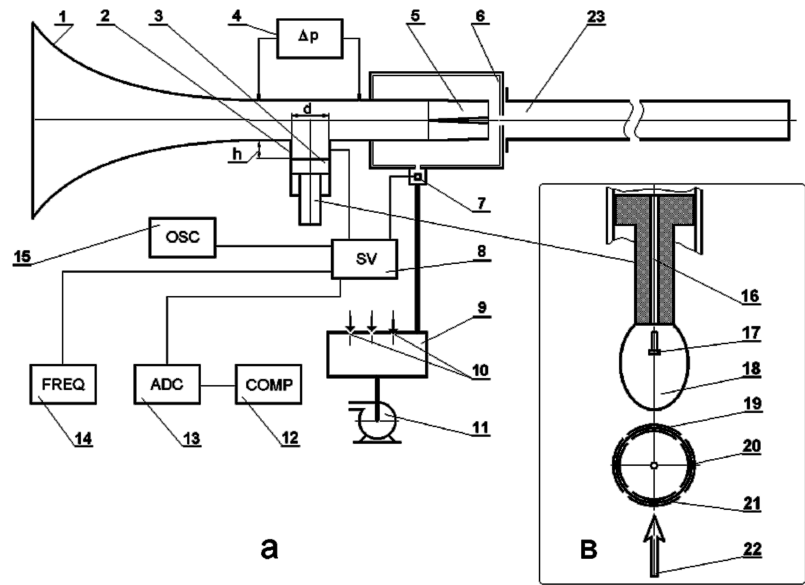


Рис.2. Схема экспериментального стенда: 1 — канал; 2 — цилиндрическая стенка лунки (пьезокерамический датчик); 3 — дно лунки (подвижный поршень); 4 — измеритель перепада давления на участке; 5 — разрезной выход; 6 — неплотный обратный клапан; 7 — дополнительный пьезокерамический датчик; 8 — переключатель сигналов; 9 — глушитель; 10 — клапаны регулирования расхода; 11 — нагнетатель; 12 — компьютер; 13 — аналого-цифровой преобразователь; 14 — частотомер; 15 — осциллограф; 16 — осевое отверстие в подвижном поршне (вариант исполнения); 17 — пробка осевого отверстия; 18 — демпфер; 19 — датчик колебаний кормовой части лунки; 20 — датчик колебаний боковой части лунки; 21 — датчик колебаний носовой части лунки; 22 — направление потока; 23 — «удлинитель».

рабочий участок 1. Расход воздуха от опыта к опыту изменялся вследствие открывания определенного количества клапанов 10 в глушителе 9. Скорость воздуха над лункой изменялась в диапазоне $6,7 \text{ м/с} < U < 43,8 \text{ м/с}$, что соответствовало диапазону чисел Рейнольдса $7000 < Re_d < 46000$. Толщина пограничного слоя находилась в пределах $4,7 \text{ мм} > \delta > 1,6 \text{ мм}$. Отношение глубины лунки к толщине пограничного слоя находилось в пределах $7,6 < h/\delta < 0,3$. Течение перед лункой было ламинарным до скорости $27,2 \text{ м/с}$. Динамическое воздействие потока воздуха на стенки лунки приводило к возникновению соответствующих электрических сигналов, которые через переключатель 8 воспринимались аналого-цифровым преобразователем 13 и запоминались в цифровом виде в компьютере 12. Переключатель 8 позволял направлять сигнал от датчика на частотомер 14 или осциллограф 15. Подобным образом записывался или визуализировался сигнал от добавочного микрофона 7.

Область возмущения давления, производимого лункой на поток, составляет около одного диаметра лунки [16]. Исходя из этого, выбира-

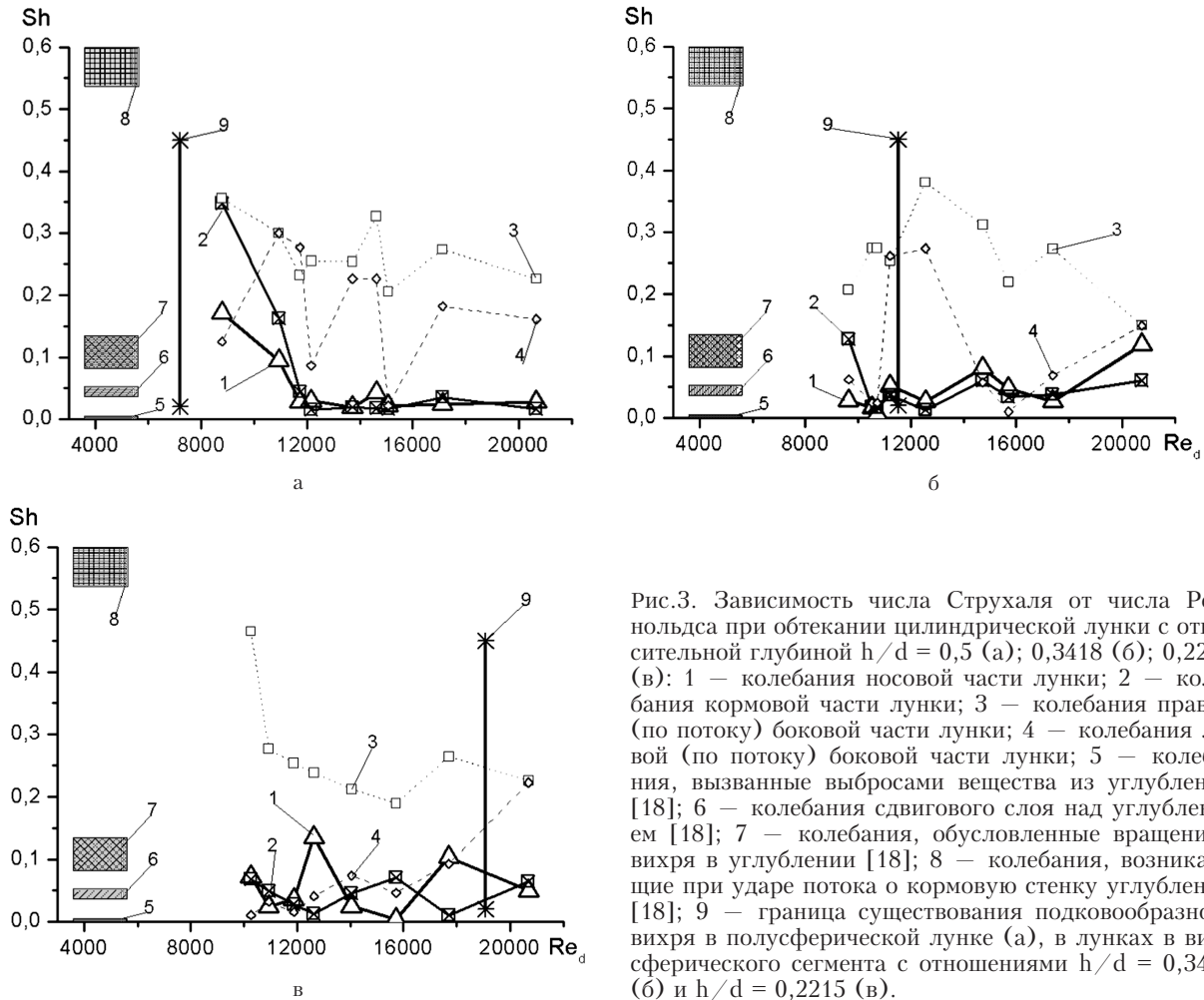


Рис.3. Зависимость числа Струхалия от числа Рейнольдса при обтекании цилиндрической лунки с относительной глубиной $h/d = 0,5$ (а); $0,3418$ (б); $0,2215$ (в): 1 – колебания носовой части лунки; 2 – колебания кормовой части лунки; 3 – колебания правой (по потоку) боковой части лунки; 4 – колебания левой (по потоку) боковой части лунки; 5 – колебания, вызванные выбросами вещества из углубления [18]; 6 – колебания сдвигового слоя над углублением [18]; 7 – колебания, обусловленные вращением вихря в углублении [18]; 8 – колебания, возникающие при ударе потока о кормовую стенку углубления [18]; 9 – граница существования подковообразного вихря в полусферической лунке (а), в лунках в виде сферического сегмента с отношениями $h/d = 0,3418$ (б) и $h/d = 0,2215$ (в).

лась длина участка рабочего канала 4, охватывающего лунку, на котором измерялся перепад статического давления (микроманометр МКВ-2500-2). Температура воздуха на входе в рабочий участок 18 измерялась лабораторным термометром ТЛ-0,1. Скорость в калиброванном канале на входе в рабочий участок V_0 определялась с помощью чашечного анемометра У1.1 (ГОСТ 6376-74). Атмосферное давление измерялось барометром БАММ-1.

Сигналы от датчиков давления, записанные синхронно со временем процесса в виде цифровых файлов, обрабатывались с помощью программы, реализующей быстрое преобразование Фурье [19]. Погрешности измерения характерных параметров опытов не превышали 12 %.

Результаты исследований и анализ данных

Числа Струхалия, соответствующие гармоникам с наибольшими амплитудами колебаний

четырёх датчиков (носового, кормового и двух боковых) в зависимости от чисел Рейнольдса для лунок с относительными глубинами $h/d = 0,5$; $0,3418$; $0,2215$ приведены на рис.3. (Колебания, соответствующие характерным частотам самого канала, не учитывались.)

При малых числах Рейнольдса числа Струхалия, соответствующие колебаниям кормовой части лунки, выше, чем носовой. Числа Струхалия, соответствующие колебаниям боковых частей лунки изменяются в довольно широком диапазоне. В связи с тем, что за каждый оборот вихря поток дважды воздействует на изогнутую поверхность бокового датчика, необходимо учитывать половинное значение регистрируемой частоты. Средние значения частот, регистрируемых боковыми датчиками, находятся в пределах, определенных в работе [18] для диапазона колебаний, вызываемых вращением вихря в углублении (рис.3, линия 7). При числах Рейнольдса больших границы существования под-

ковообразного вихря в углублении (рис.3, линия 9) амплитуды колебаний правой и левой частей лунки отличаются примерно вдвое, что свидетельствует о несимметричности вихря. Средние значения чисел Струхала, соответствующих колебаниям носовой части лунки, находятся в хорошем соответствии со значениями частот колебаний сдвигового слоя над углублением [18] (рис.3, линия 6).

В опытах со сверлением в поршне диаметр осевого углубления составлял 4 мм при глубине 22,6 мм. При этом объем лунки увеличивался на 284 мм³. Для лунок с относительными глубинами $h/d = 0,1; 0,2215; 0,3418; 0,5$ доля увеличения объема составляла соответственно $\delta V = 0,917; 0,4139; 0,2682; 0,1833$. Больше влияние дополнительное осевое углубление оказывает на мелкие лунки.

Собственные частоты примененного осевого углубления как четвертьволнового резонатора составляли 3,5 кГц и 13 кГц как резонатора Гельмгольца, так что они не могли непосредственно наложиться на спектр колебаний самой лунки. Зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса для лунки с относительной глубиной $h/d = 0,5$ и осевым углублением показана на рис.4.

Появление на дне лунки осевого углубления привело к регистрации существенной разности частот колебаний носовой и кормовой частей лунки. Возможно, что при отсутствии осевого углубления часть колебаний «транспор-

тировалась» к носовому участку обратным потоком у дна лунки.

Еще один вариант зависимости числа Струхала от числа Рейнольдса демонстрирует лунка с осевым отверстием в поршне, соединенным с упругим объемом (см. рис.4). Упругий объем представлял собой емкость из тонкой резины размером 20 мл. Способность этой емкости к деформированию составляла 31 мм³/мм вод. ст.

При числах Рейнольдса более 14000 разность между частотами колебаний носовой, кормовой и боковой поверхностей лунки находится в пределах погрешности эксперимента, а их значения соответствуют частоте вращения вихря в углублении.

Применение осевого углубления в поршне уменьшило амплитуды колебаний на боковых стенках в 5,5–7,5 раз, в носовой части лунки — в 4–6 раз, в кормовой — в 2 раза. Применение сквозного отверстия с упругим объемом уменьшило амплитуды колебаний на боковых стенках в 2–5 раз.

Изменение характера обтекания лунки можно заметить и по анализу гидравлического сопротивления участка, на котором она расположена.

На рис.5 приведены коэффициенты гидравлического сопротивления участка, на котором расположена лунка, в зависимости от числа Рейнольдса (определяющий размер — диаметр лунки). Коэффициент гидравлического сопротивления этого участка определялся из следующих соображений.

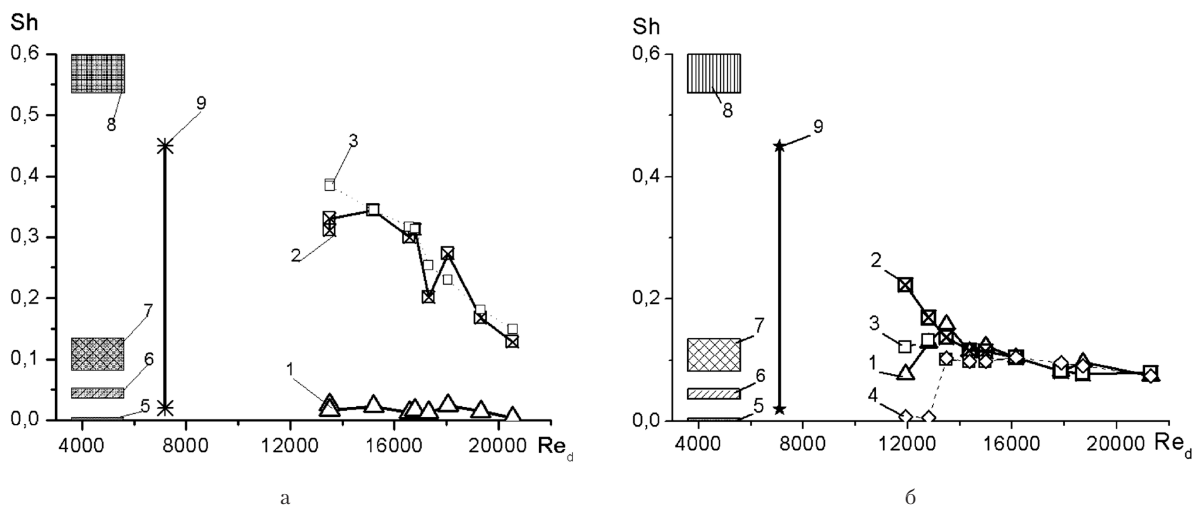


Рис.4 Зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса при обтекании цилиндрической лунки с относительной глубиной $h/d = 0,5$ и осевым углублением (а), с осевым отверстием в поршне, соединенным с упругим объемом (б): 1 — колебания носовой части лунки; 2 — колебания кормовой части лунки; 3 — колебания правой (по потоку) боковой части лунки; 4 — колебания левой (по потоку) боковой части лунки; 5 — колебания, вызванные выбросами вещества из углубления [18]; 6 — колебания сдвигового слоя над углублением [18]; 7 — колебания, обусловленные вращением вихря в углублении [18]; 8 — колебания, возникающие при ударе потока о кормовую стенку углубления [18]; 9 — граница существования подковообразного вихря в лунке в виде сферического сегмента с отношением $h/d = 0,5$ (а) и в полусферической лунке (б).

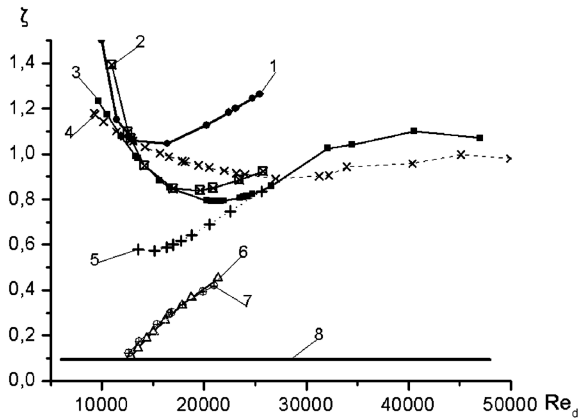


Рис.5. Коэффициент сопротивления участка с цилиндрической лункой и различными отношениями ее глубины к диаметру h/d : 1 – 0,5; 2 – 0,7532; 3 – 0,3418; 4 – 0,2215; 5 – 0,1; 6 – 0,5 (с осевым углублением и упругим объемом); 7 – 0,5 с осевым углублением; 8 – гладкий канал [21].

Измеренный перепад давления Δp больше перепада давления Δp_ζ , определяемого наличием лунки, на величину потерь на трение $\Delta p_{тр}$:

$$\Delta p = \Delta p_\zeta + \Delta p_{тр}. \quad (7)$$

Потери давления, вызванные трением о стенки, определялись в соответствии с [21]:

$$\Delta p_{тр} = \lambda \times \rho U^2 / (D_e \cdot 2), \quad (8)$$

где x – расстояние между точками замера давления; ρ – плотность воздуха; U – скорость; D_e – внутренний диаметр канала,

$$\lambda = 1 / (1,8 \lg Re_{De} - 1,64)^2. \quad (9)$$

Коэффициент сопротивления, вызванного наличием лунки:

$$\zeta = 2 \Delta p_\zeta / \rho U^2. \quad (10)$$

После подстановки численных значений коэффициент сопротивления, вызванного наличием лунки, может рассчитываться по выражению

$$\zeta = 1834485 \Delta p / Re_d^2 - 3,7915 / \lg (1,1532 Re_d - 1,64)^2. \quad (11)$$

Значения коэффициентов сопротивления участка канала с цилиндрической лункой различной глубины при больших числах Рейнольдса ($Re_d > 25000$) распределяются в соответствии с результатами Вигхарта, приведенными в работе [8]. Наибольшие значения соответствуют лунке с отношением глубины к диаметру $h/d = 0,5$. Ниже располагаются величины, соответствующие относительным глубинам $h/d =$

$= 0,3418$ и $0,2215$. Значительного понижения гидравлического сопротивления для «сверхглубоких» лунок ($h/d = 0,7532$), как это предсказывалось в работах [3, 22], не наблюдалось. Значение их коэффициента сопротивления всего лишь сравнивалось со значением коэффициента для лунок с $h/d = 0,2215$. В диапазоне чисел Рейнольдса $13000 < Re_d < 23000$ коэффициент сопротивления для лунок с $h/d = 0,2215$ оказывается больше, чем для лунок с $h/d = 0,3418$. Это качественно соответствует немонотонной зависимости коэффициента сопротивления от относительной глубины из работы [8].

Выводы

Экспериментально получены подтверждения положений о возникновении при обтекании цилиндрических лунок колебаний с частотами, по крайней мере, в трех диапазонах. Эти диапазоны можно связать с явлениями, возникающими при ударе потока о кормовую часть лунки, вращением вихря в углублении и выбросом вещества из углубления.

Оптимистические прогнозы относительно низкого гидравлического сопротивления каналов с лунками с относительной глубиной больше 0,5 подтвердились лишь частично. В узком диапазоне чисел Рейнольдса подтверждена немонотонная зависимость коэффициента сопротивления от относительной глубины лунки.

Подключение к донной части лунок дополнительных емкостей даже небольшого объема может привести к существенному демпфированию колебаний и уменьшению гидравлического сопротивления. При этом величины чисел Струхала располагаются в области 0,1.

Эти данные могут быть использованы при проектировании поверхностей теплообмена, например, трубчатых с интенсификацией теплоотдачи. При желании приблизить частоты колебаний потока в лунке к значениям, кратным частоте срыва вихрей с цилиндра, следует отдавать предпочтение лункам большего диаметра.

Одной из причин различия интенсификации теплообмена с помощью лунок в узких и широких каналах может оказаться взаимодействие звуковых и псевдозвуковых колебаний со сдвиговым слоем над углублением.

Список литературы

1. Коваленко Г.В., Халатов А.А. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов // Прикладная гидромеханика. – 2008. – № 1. – С. 23–32.

2. Турик В.Н., Бабенко В.В., Воскобойник В.А., Воскобойник А.В. Вихревое движение в полусферической лунке на поверхности обтекаемой пластины // Вісн. НТУУ «КПІ». Машинобудування. — 2006. — Т. 48. — С.79–85.
3. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. — М.: Наука, 1981. — 208 с.
4. Воропаев Г.А., Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Гринченко В.Т., Исаев С.А., Розумнюк Н.В. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки // Акустический вестник. — 2008. — Т. 11, № 3. — С. 27–49.
5. Rockwell D., Naudascher E. Review-Self-sustaining oscillations of flow past cavities // J. Fluids Eng. — 1978. — Т. 100, № 2. — P. 152–165.
6. Foley A. W., Howe M. S., Brungart T. A. Sound generated by a jet-exited spherical cavity // Journal of Sound and Vibration. — 2008. — Vol. 315, Iss. 1–2. — P. 89–99.
7. Ahuja K., Mendoza J. Effects of cavity dimensions, boundary layer and temperature on cavity noise with emphasis on benchmark data to validate computational aeroacoustic codes // NASA CR. — 1995. — № 4653. — P. 1–284.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1969. — 742 с.
9. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В., Дилевская Е.В., Исаев С.А. Существо механизма интенсификации теплообмена на поверхности со сферическими выемками // Известия Академии наук. Энергетика. — 2002. — № 2. — С. 117–135.
10. Hankey W. L. Shang J. S. Analyses of Pressure Oscillations in an Open Cavity // AIAA Journal. — 1980. — Vol. 18, № 8. — P. 892–898.
11. Воскобойник А. В. Формування когерентних вихрових структур у закручених потоках і заглибленнях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 2005. — 18 с.
12. Michalke A. On the Inviscid Instability of the Hyperbolic-Tangent Velocity Profile // Journal of Fluid Mechanics. — 1964. — Vol. 19. — P. 543–556.
13. Розумнюк Н.В. В'язка взаємодія вихрових структур зі зсувною течією: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Київ, 2003. — 19 с.
14. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). — Киев, 2005. — 76 с.
15. Кесарев В.С., Козлов А.П. Структура течения и теплообмен при обтекании полусферического углубления турбулизированным потоком воздуха // Вестник Моск. гос. технол. ун-та. — 1993. — № 1. — С. 106–115.
16. Терехов В.И., Калинина С.В., Мшвидобадзе Ю.М. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной // Сибирский физико-технический журнал. — 1992. — Вып. 1. — С. 77–84.
17. Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Олейников В.Г., Алексеев В.В. Механизмы смерчевой интенсификации теплообмена // Первая российская национальная конференция по теплообмену. Том 8. Интенсификация теплообмена. — Москва, 1994. — С. 97–105.
18. Воскобойник А.В., Воскобойник В.А. Источники резонансных мод осцилляций внутри обтекаемой полусферической лунки // Акустический вестник. — 2007. — Т. 10, № 4. — С. 36–45.
19. Рабиндер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: Мир, 1978. — 442 с.
20. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. — М.: Энергия, 1974. — 448 с.
21. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.
22. Кубанский П.Н. Поведение резонансной системы в потоке // Журн. техн. физики. — 1957. — Т. 27, № 1. — С. 180–188.

Поступила в редакцию 28.08.14

Коваленко Г. В., канд. техн. наук

Институт технічної теплофізики НАН України, Київ

вул. Желябова, 2а, 03057 Київ, Україна, e-mail: gkliashkova5@gmail.com

Особливості аеродинаміки теплообмінних поверхонь з циліндричними лунками

Розглянуто питання гідродинаміки біля теплообмінних поверхонь, формованих циліндричними лунками різної глибини. Відомо, що у деякому діапазоні швидкостей при обтіканні таких поверхонь порушується аналогія Рейнольдса та приріст теплообміну після структурування поверхні лунками перевищує відповідне збільшення гідравлічного опору. Однією з причин цього явища є утворення у заглибинах вихрових структур з характерними для них осциляціями. У роботі експериментально визначено залежності чисел Струхалія і коефіцієнтів гідравлічного опору від числа Рейнольдса при обтіканні циліндричних лунок різної глибини. Досліджувані лунки роз-

ташовувалися у каналі з входом, що виконаний за формою сопла Вітошинського. Сама лунка являла собою трубку, виготовлену з п'єзокераміки, на поверхні якої напленням були виконані 4 датчика тиску у носовій, кормовій та бічних областях. Рухливий поршень усередині трубки міг займати різні фіксовані положення, дозволяючи утворювати лунки різної глибини, без зміни решти конструктивних та режимних параметрів. Потік перед лункою був ламінарний. Діапазон чисел Рейнольдса (розрахованих за діаметром лунки) становив від 8000 до 21000 та охоплював область існування у лунці підковоподібного та стовпоподібного вихорів. Отримано якісну відповідність дослідних даних до результатів попередників. Максимум гідравлічного опору каналу з лункою спостерігався при відносній глибині лунки 0,5. Підтверджено виникнення коливань з частотами, що можуть бути пов'язані з ударом потоку об кормову частину лунки, обертанням вихору у заглибині та викидами речовини з заглибини. Показано, що підключення до донної частини лунок невеликої додаткової ємності може привести до помітного демпферування коливань та істотного (більш ніж у 2 рази) зменшення гідравлічного опору каналу. Отримані дані можуть бути використані при проектуванні поверхонь теплообміну з інтенсифікацією тепловіддачі. *Бібл. 22, рис. 5.*

Ключові слова: теплообмінні поверхні, циліндричні лунки, пульсації тиску, гідравлічний опір, число Струхаля, число Рейнольдса.

Kovalenko G.V., Candidate of Technical Science

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Science of Ukraine, Kiev

2a, Zheliabov Str., 03057 Kiev, Ukraine, e-mail: gkliashkova5@gmail.com

Aerodynamics Features of Heat Transfer Surfaces with Cylindrical Dimples

The questions about the hydrodynamics of the heat transfer surfaces formed by cylindrical dimples of different depths were observed. It is known that in a certain range of speed at a flow of such surfaces Reynolds analogy is broken and the increment of heat transfer after the surface structuring by dimples exceeds the increase in flow resistance. One reason for this phenomenon is the formation in cavities of the vortex structures with characteristic oscillations. The dependences of the Strouhal number and the coefficients of the hydraulic resistance on the Reynolds number in air streamline under cylindrical dimples of different depths were experimentally determined. The test dimples were located in a channel with an inlet formed in the shape of the nozzle Vitoshynskyj. Dimple itself is a tube made of piezoelectric ceramics, the surface of which were carried out by spraying 4 pressure sensors at the bow, stern and side areas. Movable piston inside the tube could occupy different fixed positions, allowing forming the dimples of different depths, without changing the rest of the design features. Flow was laminar up to the dimple. Range of Reynolds numbers (calculated from the diameter of the dimple) ranged from 8000 to 21000, covering the region of existence in the dimple as a horseshoe, and columnar vortices. The qualitative agreement of the experimental data with the results of its predecessors was obtained. Maximum flow resistance of the channel with the dimple observed at a relative depth of the dimple equal to 0.5. The occurrence of oscillations with frequencies that can be associated with the impact of the flow on the stern of the dimple, the rotation of the vortex in deepening and ejections from the dimple was confirmed. It is shown that the connection to the bottom of the dimple small additional volume may result noticeable damping oscillations and considerable (more than 2-fold) decrease the hydraulic resistance of the channel. The data obtained can be used in the design of the heat exchanger for the augmentation of heat transfer. *Bibl. 22, Fig. 5.*

Key words: heat transfer surfaces, cylindrical dimples, pressure pulsation, hydraulic resistance, Strouhal number, Reynolds number.

References

1. Kovalenko G.V., Halatov A.A. Granicy rezhimov techenija v uglubljenjah na ploskoj poverhnosti, imejushhij formu sfericheskikh segmentov [Boundaries of Flow Regimes in the Dimples in the Form of Spherical Segments on a Flat surface], *Prikladnaja gidromehanika*, 2008, (1), pp. 23–32. (Rus).
2. Turik V.N., Babenko V.V., Voskoboynik V.A., Voskoboynik A.V. Vihrevoe dvizhenie v polusfericheskoj lunke na poverhnosti obtekaemoj plastiny [Swirling in the Hemispherical Dimple on the Surface of the Streamlined Plate], *Visnik NTUU «KPI». Mashinobuduvannja*, 2006, (48), pp. 79–85. (Rus).
3. Blohincev D.I. Akustika neodnorodnoj dvizhu-shhejsja sredy [Acoustics of Inhomogeneous Moving Medium]. Moscow : Nauka, 1981, 208 p. (Rus).
4. Voropaev G.A., Voskoboynik A.V., Voskoboynik V.A., Grinchenko V.T., Isaev S.A., Rozumnjuk N.V. Istochniki psevdozvukovykh pul'sacij davlenija pri obtekanii sfericheskoj lunki [Sources of Pseudo-sound Pulsations of Pressure under a Spherical Dimple Flowing], *Akusticheskij vestnik*, 2008, 11 (3), pp. 27–49. (Rus.)
5. Rockwell D., Naudascher E. Review-Self-sustaining Oscillations of Flow past Cavities, *J. Fluids Eng*, 1978, 100 (2), pp. 152–165.
6. Foley A.W., Howe M.S., Brungart T.A. Sound Generated by a Jet-exited Spherical Cavity. *Journal of Sound and Vibration*. 2008, 315, Iss. 1–2, pp. 89–99.
7. Ahuja K., Mendoza J. Effects of Cavity Dimensions, Boundary Layer and Temperature on Cavity Noise with Emphasis on Benchmark Data to Validate Computational Aeroacoustic Codes, *NASA CR*, 1995, (4653), pp. 1–284.
8. Shlihting G. Teorija pogrannichnogo sloja [Boundary Layer Theory], Moscow : Nauka, 1969, 742 p. (Rus.)
9. Leont'ev A.I., Olimp'ev V.V., Dilevskaja E.V., Isaev S.A. Sushhestvo mehanizma intensivifikacii teploobmena na poverhnosti so sfericheskimi vyemkami [Essential of Heat Transfer Augmentation on a Surface with Spherical Dimples], *Izvestija Akademii nauk. Jenergetika*, 2002, (2), pp. 117–135. (Rus.)
10. Hankey W.L., Shang J.S. Analyses of Pressure Oscillations in an Open Cavity, *AIAA Journal*, 1980, 18 (8), pp. 892–898.
11. Voskoboynik A.V. Formuvannja kogerentnih vihrovih struktur u zakruchenih potokah i zagliblennjah [Formation of Coherent Vortex Structures in Swirling Flows and Dimples] : Avtoreferat dis. ... kand. techn. nauk. Kiev, 2005, 18 p. (Ukr.)
12. Michalke A. On the Inviscid Instability of the Hyperbolic-Tangent Velocity Profile, *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 19, pp. 543–556.
13. Rozumnjuk N.V. V'jazka vzaemodija vihorovih struktur zi zsvnoju techieju [Viscous Interaction of Vortex Structures with Shear Flow] : Avtoreferat dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Kiev, 2003, 19 p. (Ukr.)
14. Halatov A.A. Teploobmen i gidrodinamika okolo poverhnostnykh uglubljenij (lunok) [Heat Transfer and Hydrodynamics near the Surface Pits (Dimples)], Kiev, 2005, 76 p. (Rus.)
15. Kesarev V.S., Kozlov A.P. Struktura techenija i teploobmen pri obtekanii polusfericheskogo uglubljenja turbulizirovannym potokom vozduha [Flow Structure and Heat Transfer in a Hemispherical Dimple by Turbulized Airflow], *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tehnologicheskogo Universiteta*, 1993, (1), pp. 106–115. (Rus.)
16. Terehov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Yu. Jeksperimental'noe issledovanie razvitiya techenija v kanale s polusfericheskoj kavernoju [Experimental Study of Flow in a Channel with a Hemispherical Cavity], *Sibirskij fiziko-tehnicheskij zhurnal*, 1992, iss. 1, pp. 77–84. (Rus.)
17. Kiknadze G.I., Gachechiladze I.A., Olejnikov V.G., Alekseev V.V. Mehanizmy smerchevoj intensivifikacii teplomassoobmena [Tornado Intensification Mechanisms of Heat and Mass Transfer], *Pervaja rossijskaja nacional'naja konferencija po teploobmenu. Tom 8. Intensifikacija teploobmena*. Moscow, 1994, pp. 97–105. (Rus.)
18. Voskoboynik A.V., Voskoboynik V.A. Istochniki rezonansnykh mod oscillacij vnutri obtekaemoj polusfericheskoj lunki [Sources of Resonant Oscillation Modes within the Streamlined Hemispherical Dimple], *Akusticheskij vestnik*, 2007, 10 (4), pp. 36–45. (Rus.)
19. Rabinder L., Gould B. Teorija i primenenie cifrovoj obrabotki signalov [Theory and Application of Digital Signal Processing]. Moscow : Mir, 1978, 442 p. (Rus.)
20. Kirillin V.A., Sychev V.V., Shejndlin A.E. Tehnicheskaja termodinamika [Engineering Thermodynamics]. Moscow : Jenergija, 1974, 448 p. (Rus.)
21. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam [Handbook of Hydraulic Resistance]. Moscow : Mashinostroenie, 1992, 672 p. (Rus.)
22. Kubanskij P.N. Povedenie rezonansnoj sistemy v potoke [Resonant System Behavior in a Stream], *Zhurnal tehnichekoj fiziki*, 1957, 27 (1), pp. 180–188. (Rus.)

Received August 28, 2014