

В заключение авторы выражают благодарность И. В. Стуровой за инициативу проведения подобных исследований и А. Т. Онуфриеву за проявленный интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Long R. R. Some aspects of the flow of stratified fluids. III. Continuous density gradients // *Tellus*. 1955. V. 7. No. 3. P. 341–357.
2. Miles J. W. Lee waves in a stratified flow. Part 2. Semi-circular obstacle // *J. Fluid Mech.* 1968. V. 33. No. 4. P. 803–814.
3. Аксенов А. В., Городцов В. А., Стурова И. В. Моделирование обтекания цилиндра стратифицированной идеальной несжимаемой жидкостью: Препринт ИПМ АН СССР № 282. М., 1986. 60 с.
4. Кириллов В. П., Можжев В. В., Моисеенко Г. С. и др. Возмущения, создаваемые движущимся в стратифицированной жидкости телом // *Современные проблемы механики сплошных сред. Междуведомственный сборник*. М.: МФТИ, 1985. С. 143–150.
5. Castro I. P. A note on lee wave structures in stratified flow over three-dimensional obstacles. *Tellus*. 1987. V. 39A. No. 1. P. 72–81.
6. Honji H., Kamachi M. Wakes of a circular cylinder in stratified fluids // *Rep. Res. Inst. Appl. Mech.* 1984. V. 31. No. 98. P. 89–95.
7. Sheppard P. A. Airflow over mountains // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1956. V. 82. No. 365. P. 528–529.
8. Baines P. G. Upstream blocking and airflow over mountains. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1987. V. 19. P. 75–97.

Москва

Поступила в редакцию
5.II.1988

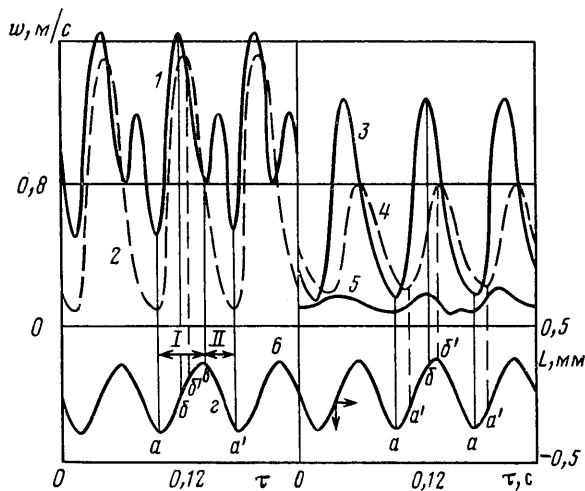
УДК 533.17

РОСЕНКО Г. Д., САПОЖНИКОВ Б. Г., УСЕНКО Ю. А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ СТРУЙ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ПОЛОСТИ С ВИБРИРУЮЩЕЙ ВНУТРЕННЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Исследуются закономерности истечения пульсирующих одиночной и однорядной систем струй, возникающих при поперечных колебаниях горизонтального цилиндра, размещенного коаксиально в неподвижном перфорированном кожухе.

Размещение вертикально вибрирующего тела, например горизонтального цилиндра, внутри неподвижного перфорированного кожуха с зазором, соответствующим амплитуде вибрации, позволяет в 2–2,5 раза увеличить теплообмен такого



Фиг. 1

тела с окружающей средой [1]. Наблюдаемая интенсификация теплообмена обусловлена неустановившейся фильтрацией воздуха через отверстия в коже. Возникающие при этом пульсирующие струи отличаются от рассмотренных в [2] периодическим изменением направления на противоположное. Истечение таких (знакопеременных) струй изучено недостаточно [3].

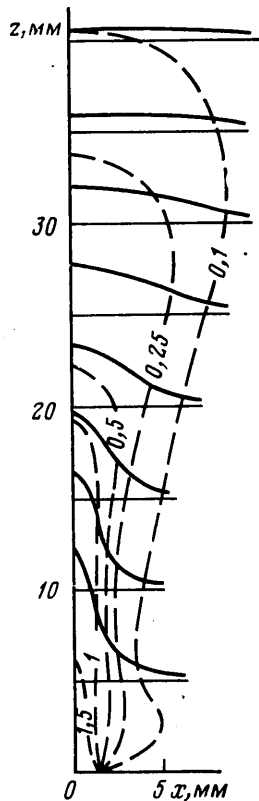
Ниже приведены результаты экспериментального исследования формы, дальности и скорости знакопеременных струй, которые создавались при вертикально направленных колебаниях горизонтального цилиндра диаметром 35 и длиной 145 мм, размещенного внутри неподвижной перфорированной трубы толщиной 2 мм. С помощью специального приспособления цилиндр устанавливался на стол вибростенда частота вибрации которого $f=10-30$ Гц, амплитуда $A=1-3$ мм. Применялся набор перфорированных труб, что позволяло варьировать исходную толщину кольцевой полости h между поверхностью цилиндра и трубой, а также тип перфорации, выполненной в виде одного ряда отверстий вдоль верхней образующей. Толщина полости h составляла 5–25 мм, диаметр отверстий $d=2-8$ мм, шаг между отверстиями $s=6-12$ мм. Скорость измерялась с помощью проволочного вольфрамового термоанемометра постоянной температуры диаметром 8 мкм и длиной 2 мм. Градуировка термоанемометра проводилась по методике, описанной в [4]; погрешность измерения величины не превышала 4%. При исследовании формы и дальности струи датчик термоанемометра перемещался в пространстве снаружи перфорированной трубы с помощью координатного устройства вдоль оси струи z и в поперечном направлении x . Абсолютная погрешность контроля перемещения составляла $\pm 0,2$ мм.

На фиг. 1 приведены осциллограммы продольной составляющей модуля скорости w одиночной струи при расположении датчика на верхнем срезе ($z=0$, кривая 1) отверстия $d=3$ мм при $f=24$ Гц, $A=2,5$ мм, $h=5$ мм и на расстояниях от него вдоль оси струи $z=5, 10, 20$ и 30 мм (кривые 2–5 соответственно). Кривая 6 характеризует колебания цилиндра по синусоидальному закону $L=A \sin(2\pi ft + \pi)$. Из фиг. 1 видно, что изменение скорости w имеет регулярный характер. В начальном сечении струи (кривая 1) за время одного периода колебания (точки $a-a_1$) наблюдается два максимума (точки b и g) и два минимума (точки a и e). Максимумы в точках b и g обусловлены тем, что при фазовых углах, соответствующих этим точкам, скорость перемещения цилиндра наибольшая. Минимумы в точках a и e связаны с изменением направлений движения цилиндра и истечения струи. Кривая 1 не проходит через нуль, так как при изменении направления движения цилиндра (точки a, e) всегда имеют место поперечные потоки воздуха относительно отверстия в коже и турбулентные вихри в следе пульсирующей струи вследствие гидродинамического несовершенства отверстий.

При удалении от начального сечения струи (фиг. 1, кривые 2–5) характер осциллограмм резко меняется: при сохранении периодичности отсутствуют второй максимум и минимум, а минимальные значения приближаются к нулю; следовательно, поперечная составляющая скорости незначительна. Поэтому кривые 2–5 отражают изменение продольной составляющей модуля скорости w при истечении воздуха из полости. Кроме того, с ростом z от 5 до 20 мм (кривые 2–4) происходит снижение максимума скорости и смещение его в сторону фазового угла, соответствующего верхнему положению вибрирующего цилиндра (точка b'); на расстоянии $z=30$ мм (кривая 5) струю можно считать практически заторможенной.

На участке II воздух втекает в полость. Ему на кривой 1 соответствует меньший максимум (точка g), что согласуется с данными [3]. Хорошее совпадение кривых 1 и 2 на участке I свидетельствует о том, что с помощью датчика, размещенного на верхнем срезе отверстия, можно получить достоверную информацию об изменении продольной составляющей скорости истечения из кольцевой полости с вибрирующей внутренней цилиндрической поверхностью.

При размещении датчика термоанемометра на нижнем срезе отверстия были получены аналогичные осциллограммы, отличающиеся от кривой 1 (фиг. 1) только тем, что участки I и II менялись местами. Поэтому в основном изучались знако-



Фиг. 2

переменные струи, для которых в качестве начального сечения принимался верхний срез отверстий, так как исследование таких струй проще.

На основании данных по пульсациям скорости, измеренным на оси струи (фиг. 1) и на различных расстояниях от нее, были построены профили максимальных значений продольной составляющей w (сплошные линии на фиг. 2, для них масштаб по вертикали равен 1 м/с) при изменении z от 5 до 40 мм штрихами нанесены изолинии скорости; цифры на них характеризуют значения w . Так как, согласно данным на фиг. 1, появление максимумов w наступает в течение $1/4$ периода колебаний цилиндра, то приведенная на фиг. 2 картина несколько идеализирована. Из фиг. 2 видно, что происходит непрерывная деформация профиля скорости: с увеличением расстояния z от начального сечения струи профиль скорости расширяется и становится ниже. Кроме того, можно выделить начальный и основной участки струи. Наличие начального участка подтверждается формой изолинии $w=1,5$ м/с. Изолинии скорости основного участка образуют факел, ширина которого при $w=1$ и 0,5 м/с практически не изменяется, а при $w=0,25$ и 0,1 м/с значительно увеличивается по мере удаления от начального сечения струи.

Аналогичные данные были получены для однорядной системы струй. Установлено, что вследствие взаимодействия соседних струй между собой на границе между ними скорость достигает минимума, абсолютные значения которого по мере удаления от начального сечения струи постепенно увеличиваются, а максимум уменьшается, что приводит к выравниванию профиля скорости. В дальнейшем (при $z>20$ мм) наблюдалось пропорциональное уменьшение всего профиля скорости, пока не происходило полное торможение потока. Существенно изменялась и форма изолиний скорости, которая при $w<0,5$ м/с имела вид волнообразной кривой.

Кроме того, изучение осциллограмм скорости для однорядной системы струй при расположении датчика термоанемометра на верхнем срезе отверстия с изменением одного из факторов (A, f, d, h, s) при прочих равных условиях позволило установить следующее. Во всех случаях изменение скорости w во времени t было регулярным. В исследованном диапазоне параметров вибрации с ростом A или f наблюдалось монотонное увеличение основного максимума скорости, который с изменением амплитуды смещался в сторону меньших фазовых углов (от 140 к 110°), а с изменением частоты — в сторону больших фазовых углов φ (от 100 к 130°). Основной минимум при $A \geq 2$ мм был при $\varphi=0^\circ$ (нижнее положение вибростол), а при $A < 2$ мм с уменьшением амплитуды углы φ увеличивались до 30° . С ростом диаметра отверстий амплитудные значения скорости проходили через максимум, а увеличение зазора h приводило к снижению скорости. Изменение s мало влияло на положения основных максимума и минимума, а при $d < 4$ мм практически не отражалось на величине скорости.

При обработке осциллограмм были рассчитаны средние скорости $\langle w \rangle$ на участке I, при обобщении которых получены следующие критериальные уравнения:

$$\langle Re \rangle = \langle w \rangle d / \nu = 23B^{0,67} C^{0,36} D^{-0,1} \quad (B < 26)$$

$$\langle Re \rangle = 5,76B^{0,7} C^{0,66} D^{0,86} \quad (B > 26)$$

$$B = fd^2 / \nu, \quad C = (h + A) / (h - A), \quad D = s / d$$

со среднеквадратичным отклонением от опытных точек, не превышающим 11%, справедливые при $B=6-103$, $C=1,2-4$, $D=2-5$, где ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Усенко Ю. А., Сапожников Б. Г., Косенко Г. Д. Теплообмен вертикально вибрирующего горизонтального цилиндра, расположенного внутри неподвижной перфорированной трубы // Изв. вузов. Машиностроение. 1983. № 10. С. 69–73.
2. Дыбан Е. П., Мазур А. И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. Киев: Наук. думка, 1982. 302 с.
3. Галиуллин Р. Г., Ревва И. П. Истечение пульсирующей струи из цилиндрического канала при колебаниях большой амплитуды // Изв. вузов. Энергетика. 1987. № 3. С. 61–64.
4. Полегаев А. М. Управление гидродинамикой и теплообменом в пристенных струйных течениях: Дис. ... канд. Свердловск, УПИ им. С. М. Кирова. 1982. 140 с.

Свердловск

Поступила в редакцию
12.XI.1987