

УДК 533.697

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НА ЖЕСТКОЙ И УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В. В. БАБЕНКО, Л. Ф. КОЗЛОВ

(Киев)

Приводятся результаты экспериментального исследования гидродинамической устойчивости в водном потоке, выполненного на гидродинамическом стенде малой турбулентности при помощи теллур-метода на жесткой поверхности. Отработанная методика определения нейтральных кривых позволила исследовать гидродинамическую устойчивость также на упругодемпфирующих поверхностях.

1. Исследование гидродинамической устойчивости на жесткой поверхности. Экспериментальная установка, аппаратура и методика проведения исследований изложены в работе [1]. Для измерения поля скоростей и фиксирования нейтральных колебаний использовался теллур-метод [2]. Построение нейтральных кривых было выполнено как в традиционных, так и в новых координатах. Нейтральные кривые в координатах безразмерных частоты, волнового числа и фазовой скорости при продольном обтекании жесткой пластины хорошо согласуются с известными кривыми, полученными экспериментально и теоретически другими авторами. Величины нарастающей, определенные экспериментальным путем в соответствии с методикой, разработанной в работах [3, 4], также хорошо согласуются с известными данными.

Проведенные измерения позволили, во-первых, апробировать методику экспериментального исследования, во-вторых, оказалось, что результаты измерений лучше всего согласуются с расчетами Шэня [5].

В процессе измерений, проводимых при амплитуде вибратора 0.32 мм и при степени турбулентности не выше 0.04%, было обнаружено, что в каждом месте вдоль рабочей части наблюдались колебания в строго определенном диапазоне частот. Эти частоты были обработаны в безразмерном виде и нанесены на график нейтральной кривой в виде точек (фиг. 1). По предельным значениям этих точек была ограничена область, вне которой колебания любой частоты в пограничном слое не наблюдались. Кривая, охватывающая эту область, была названа предельной нейтральной кривой (штрихпунктирная линия).

Для сравнения показаны измерения нейтральных колебаний (сплошная линия). График построен в координатах безразмерной частоты $\beta' = \beta_1 \nu / U^2$ и числа Рейнольдса R' , вычисленного по толщине вытеснения δ^* , β_1 — круговая частота возмущающего колебания, ν — кинематический коэффициент вязкости жидкости, U — продольная скорость невозмущенного потока. По-видимому, предельная нейтральная кривая ограничивает область неустойчивости, связанную с нелинейными эффектами. Предельные нейтральные кривые были построены также в новых координатах, определяющих зависимость безразмерных волновых чисел и фазовых скоростей от безразмерной частоты. Обнаружено, что эти зависимости имеют определенный наклон для каждой скорости набегающего потока.

Исследовалось также влияние турбулентности основного потока и амплитуды возмущающего движения на гидродинамическую устойчивость.

Теллур-метод может применяться при скоростях основного потока, не превышающих 0.2 м/сек . Амплитуда колебаний вибратора A должна быть порядка $0.2\text{--}0.5 \text{ мм}$, а создаваемые им поперечные скорости не должны превышать 2% скорости основного потока. При отношении указанных скоростей, равном 2.5% , переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный возникает сразу же за вибратором. В этом случае $A > 0.7 \text{ мм}$, а безразмерные волновое число $\alpha\delta^*$ и скорость распространения возмущения c/U стремятся по всей толщине пограничного слоя к предельным значениям 0.5 и 0.6 соответственно. Здесь α , c — волновое число и фазовая скорость возмущающего колебания. Степень турбулентности основного потока не должна превышать 0.05% .

Определялись развитие возмущающего движения и распределение его кинетической энергии по толщине пограничного слоя. Максимальные значения составляющих скоростей возмущающего движения находились в пределах $(0.15\text{--}0.30) u/\delta$ (u — вертикальная координата, δ — толщина пограничного слоя). По направлению к внешней границе пограничного слоя $\alpha\delta^*$ уменьшалось, а c/U увеличивалось. Результаты измерения кинетической энергии возмущающего движения по толщине пограничного слоя изложены в [6].

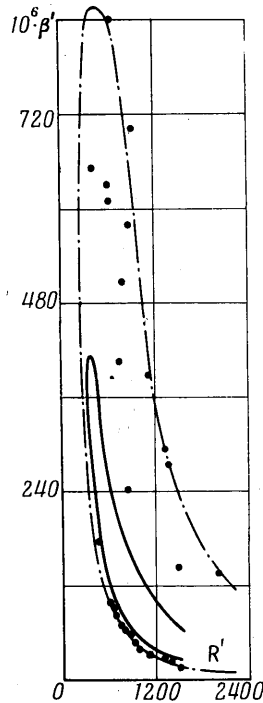
Возмущающее движение в пограничном слое создавалось также при помощи несинусоидальных колебаний, которые носили ступенчатый характер и создавались с помощью реле-вибратора. Анализ ступенчатого возмущения путем разложения в ряд Фурье показал, что основной энергонесущей гармоникой является первая гармоника.

Фиксируя значения нейтральной частоты по первой гармонике, были построены нейтральные кривые, которые охватили большую область неустойчивых колебаний, чем при синусоидальных возмущениях. Зависимости величин $\alpha\delta^*$ и c/U от безразмерной частоты подобны аналогичным зависимостям при синусоидальном возмущении, а также практически не зависят от скорости основного потока.

Кроме количественных измерений теллур-метод позволил выполнить качественные визуализированные исследования, хорошо совпадающие с результатами работ [7].

Измерения показали, что точка потери устойчивости характеризуется рядом отличительных признаков. В ее окрестностях наблюдаются наиболее высокие частоты и наиболее короткие длины волн нейтральных колебаний, наибольший диапазон частот неустойчивых колебаний, волна возмущения выражена ярче и ее гребень закручивается быстрее и ближе к вибратору.

2. Исследование гидродинамической устойчивости на упругодемпфирующих поверхностях. Теоретические исследования гидродинамической устойчивости при обтекании упругодемпфирующих поверхностей выполняются на протяжении последних десяти лет. В последнее время начали исследовать влияние на гидродинамическую устойчивость отдельных механических свойств гибких покрытий. Экспериментальные исследования были выполнены на трех видах покрытий. Мембранное покрытие состояло из полиэтиленовой пленки толщиной 0.1 мм , натянутой на жесткую раму. Конструкция покрытия позволяла устанавливать под мембраной продоль-



Фиг. 1

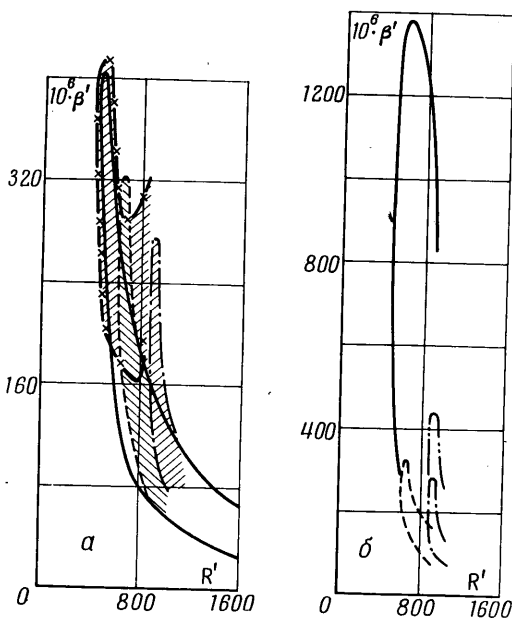
ные полоски из пенополиуретана и тем самым получать сложное мембранное покрытие. Третий вид — вязкоэластические покрытия, выполненные из листов пенополиуретана толщиной 5 и 3 см, причем листы имели разные механические свойства.

Программа исследований предусматривала изучение влияния на гидродинамическую устойчивость толщины слоя воды, находящейся под мембраной, скорости основного потока, демпфирующих свойств материалов, расположенных под мембраной,

натяжения мембраны, расположения полосок пенополиуретана, на которые опиралась мембрана, комбинации перечисленных факторов.

Уравнение движения и безразмерные параметры механических свойств мембранного покрытия приведены в [8]. Экспериментальные исследования должны подтвердить правомочность выбора критериев подобия, для вычисления которых необходимо определить натяжение элемента гибкого покрытия, его колеблющуюся массу, демпфирование и упругость. Способы определения этих величин изложены в [9-11].

На первом виде покрытия получены следующие основные результаты. Сильное натяжение мембраны приводило



Фиг. 2

к увеличению области неустойчивых колебаний и к значительному уменьшению критического числа Рейнольдса в точке потери устойчивости R_* . При этом параметр упругости $k_1 = 145$, параметр натяжения $k_2 = 7.16 \cdot 10^5$, параметр частоты $k_3 = 3.74$, параметр демпфирования $k_4 = 0.95$, параметр колеблющейся массы $k_5 = 10.4$. Аналогичное действие оказывали увеличение толщины слоя воды под мембраной и уменьшение скорости U . Изменение этих факторов в противоположную сторону приводило к улучшению стабилизирующих свойств гибкого покрытия. При этом величины параметров покрытия приближались к оптимальным значениям, рассчитанным Джирджифелви [12]

$$k_1 = 0.5 \cdot 10^{-5}, k_4 = 0.02, k_5 = 2.5 \cdot 10^4, m = 1.5, d = 0.025, \omega = 0.1, c^0 / U = 0.7$$

(где m — коэффициент массы, d — коэффициент демпфирования, ω — коэффициент предельной частоты, c^0 — скорость распространения продольной волны в мембране). Для изучения влияния на гидродинамическую устойчивость свойств подстилающей жидкости под мембраной был оставлен слой воздуха (2 см), под которым находилась вода. При этом уменьшились параметры k_2, k_3 по сравнению с опытами, когда под мембраной находилась только вода, k_4 несколько возросло. Область неустойчивости, величины частот и амплитуды нейтральных колебаний уменьшились.

При исследовании гидродинамической устойчивости на простом мембранном покрытии не было обнаружено повышения стабилизации ламинар-

ного пограничного слоя по сравнению с обтеканием жесткой стенки, так как механические свойства мембраны были далеки от оптимальных.

На сложном мембранном покрытии были проведены аналогичные исследования и получены подобные результаты. Устойчивость ламинарного пограничного слоя зависит также от расположения полосок пенополиуретана, на которые опиралась мембрана. Когда одна полоска располагалась вдоль продольной оси покрытия, а две другие — параллельно первой на расстоянии 7 см по обе стороны от нее, устойчивость возросла по сравнению с обтеканием жесткой стенки. При этом

$$k_1 = 0.82, k_2 = 1.18 \cdot 10^5, k_3 = 0.255, k_4 = 0.833, k_5 = 12.6$$

Когда полоски сдвигались вместе вдоль продольной оси покрытия, устойчивость практически оставалась такой же, как и при обтекании жесткой поверхности. В этом случае

$$k_1 = 0.8, k_2 = 1.22 \cdot 10^5, k_3 = 0.258,$$

$$k_4 = 0.934, k_5 = 12.2$$

На третьем виде покрытий исследовалась гидродинамическая устойчивость, когда листы пенополиуретана были сверху покрыты полиэтиленовой пленкой и когда пленка отсутствовала. Наилучшие результаты были получены на более толстом (5 см) листе пенополиуретана при отсутствии пленки, когда величины параметров были наиболее оптимальными

$$k_1 = 0.0189, k_2 \approx 0, k_3 = 0.143,$$

$$k_4 = 0.755, k_5 = 0.93, m = 0.0054,$$

$$d = 0.133, \omega = 0.488 \cdot 10^3, c^0 / U \approx 0$$

Сплошной линией на фиг. 2, а обозначена нейтральная кривая при обтекании жесткой поверхности, штрихпунктирная линия обозначает обтекание листа пенополиуретана без пленки, линия с крестиками — обтекание этого же листа, но покрытого пленкой

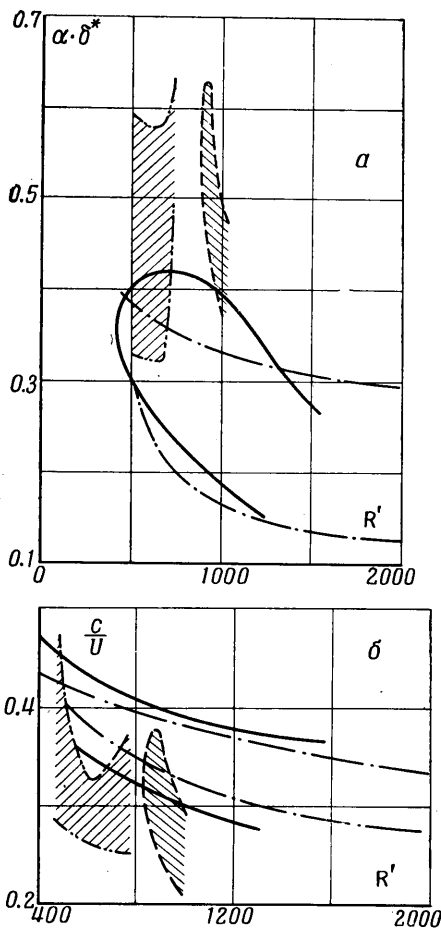
$$k_1 = 0.44, k_2 \approx 0, k_3 = 0.2, k_4 = 1.0,$$

$$k_5 = 11.0$$

Пунктирной линией обозначено обтекание листа пенополиуретана без пленки и при несинусоидальных возмущениях, при этом вследствие изменения скорости U параметры имели худшие значения:

$$k_1 = 0.036, k_2 \approx 0, k_3 = 0.219, k_4 = 1.0, k_5 = 0.75$$

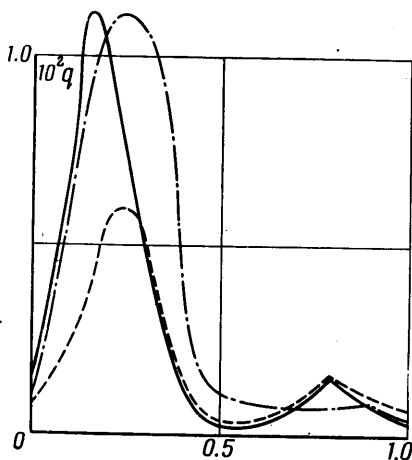
На фиг. 2, б представлены обычные нейтральные кривые при обтекании листа пенополиуретана при синусоидальных (штрихпунктирная линия) и несинусоидальных (пунктирная линия) колебаниях и предельные



Фиг. 3

нейтральные кривые, обозначенные соответственно линией с двумя точками и сплошной линией.

На фиг. 3, *a* и *b* пунктирной линией обозначено обтекание толстого листа пенополиуретана без пленки и линией с двумя точками — обтекание того же листа, накрытого пленкой. Для сравнения приводятся экспериментальные данные Шубауэра и Скрэмстэда [⁴] (штрихпунктирная линия) и авторов (сплошная линия) при исследовании устойчивости на жесткой поверхности. Из этих данных следует, что максимальные значения



Фиг. 4

частот неустойчивых колебаний, а также область неустойчивых колебаний, ограниченная предельной нейтральной кривой, уменьшились. Число Рейнольдса R_* возросло по сравнению со случаем обтекания жесткой стенки в 2.1 раза. При обтекании толстого листа пенополиуретана колебания во всем диапазоне частот до середины рабочей части не наблюдались, так как они полностью демпфировались покрытием вблизи полоски вибратора. Впервые визуально наблюдалось явление перемещения точки потери устойчивости.

Пенополиуретановый лист накрылся пленкой для контрольной проверки влияния механических свойств покрытия на его стабилизирующие

возможности. Из графиков видно, что гидродинамическая устойчивость при этом была хуже, чем при обтекании жесткой стенки.

Исследования, выполненные на тонком (3 см) листе пенополиуретана

$$k_1 = 0.063, k_2 \approx 0, k_3 = 0.3, k_4 = 1.65, k_5 = 0.7$$

показали, что устойчивость не улучшилась по сравнению с обтеканием жесткой стенки.

Почти для всех видов исследованных упругодемпфирующих покрытий форма нейтральной кривой отличалась от формы кривой при обтекании жесткой поверхности. Нейтральные кривые в координатах безразмерной частоты были подобны обозначенной на фиг. 2, *a* линии с крестиками. Это объясняется настроенностью упругодемпфирующих покрытий на узкий диапазон частот возмущающего движения.

Кроме вышеперечисленных был выполнен ряд других исследований. Измерения показали, что величины нарастаний также зависят от механических свойств гибких покрытий. Для лучшего испытанного покрытия нарастания по максимальному значению уменьшились по сравнению с обтеканием жесткой стенки в два раза. Объясняется это тем, что величина нарастания прямо пропорциональна квадрату длины волны возмущающего колебания, а длины волн при обтекании всех видов гибких покрытий уменьшились.

Измерения, выполненные по толщине пограничного слоя, показали, что для лучшего испытанного покрытия колебания наблюдаются только в слое жидкости, не превышающем $0.2y/\delta$. При неблагоприятных механических свойствах гибких покрытий с увеличением частоты возмущающее движение усиливалось и трансформировалось к внешней границе пограничного слоя.

На фиг. 4 представлено распределение средней кинетической энергии $q = (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2) / U^2$ возмущающего движения по толщине пограничного слоя при обтекании гибких поверхностей, вычисленное для второго нейтрального колебания, так же как и при обтекании жесткой поверхности [⁶] (u' , v' — продольная и поперечная составляющие скорости возмущающих колебаний). Шпильной линией обозначено течение над мембраной ($R' = 710$, $\beta' = 500 \cdot 10^{-6}$), штрихпунктирной линией — течение над мембраной, под которой находился воздух ($R' = 770$, $\beta' = 246 \cdot 10^{-6}$), пунктирной линией — течение над толстым листом пенополиуретана ($R' = 278$, $\beta' = 900 \cdot 10^{-6}$). Кинетическая энергия возмущающего движения при обтекании гибких покрытий составляла величину $(1,4 \div 0,6) \cdot 10^{-2}$, а при обтекании жесткой поверхности $2,4 \cdot 10^{-2}$. На втором и третьем видах покрытий была исследована гидродинамическая устойчивость при несинусоидальных возмущениях. Оказалось, что эти покрытия стабилизировали пограничный слой так же, как и при синусоидальных возмущениях. Например, при обтекании толстого листа пенополиуретана при несинусоидальных возмущениях R_* возросло в 1,5 раза по сравнению с обтеканием жесткой стенки при синусоидальных возмущениях (фиг. 2, а).

Механические свойства гибких покрытий существенно зависят от окружающей температуры, поэтому на втором виде покрытий было исследовано влияние на гидродинамическую устойчивость повышения температуры воды, находящейся под мембраной. Воздействие оказалось суммарным: за счет возникновения теплового пограничного слоя и вследствие изменения механических свойств покрытия. Устойчивость при этом возросла.

Поступила 7 VI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабенко В. В., Гнитецкий Н. А., Козлов Л. Ф. Гидродинамический стенд малой турбулентности, аппаратура и методика проведения исследований устойчивости ламинарного пограничного слоя. Сб. «Бионика», вып. 6, Киев, «Наукова думка», 1972.
2. Wortmann F. X. Eine Methode zur Beobachtung und Messung von Wasserströmung mit Tellur. Z. für angew. Physik, 1953, Bd 5, Nr 6.
3. Schlichting H. Berechnung der Anfänglicher Störungen bei der Plattenströmung. Nachr. Ges. Wiss. Gött. Math. Physik. Kl., 1933, S. 181.
4. Schubauer G. B., Skramstad H. K. Laminar boundary-layer oscillations and stability of laminar flow. National Bureau of Standards Research Paper, 1722, 1947.
5. Shen S. F. Calculated amplified oscillations in the plane Poiseuille and Blasius flows. J. Aeronaut. Sci., 1954, vol. 21.
6. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф. Экспериментальное исследование гидродинамической устойчивости ламинарного пограничного слоя на жесткой поверхности в водном потоке. Сб. «Гидромеханика», вып. 21, Киев, «Наукова думка», 1972.
7. Нэп К. Ф., Роуч П. Дж. Исследование перехода пограничного слоя визуальным методом и при помощи термоанемометра. Ракетная техника и космонавтика, 1968, т. 6, № 1.
8. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф. Основные характеристики гибких покрытий и критерии подобия. Сб. «Бионика», вып. 5, Киев, «Наукова думка», 1971.
9. Бабенко В. В., Гнитецкий Н. А., Козлов Л. Ф. Предварительные результаты исследования упругих свойств кожи живых дельфинов. Сб. «Бионика», вып. 4, Киев, «Наукова думка», 1970.
10. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф. Некоторые механические характеристики кожных покровов дельфинов. Сб. «Бионика», вып. 5, Киев, «Наукова думка», 1971.
11. Бабенко В. В., Суркина Р. М. Определение параметра колеблющейся массы кожных покровов некоторых морских животных. Сб. «Бионика», вып. 5, Киев, «Наукова думка», 1971.
12. Gyorgyalvy D. The possibilities of drag reduction by the use of flexible skin. AIAA 4-th Aerospace Sci. Meeting, Los Angeles, California, 1966, AIAA paper, No. 66-430.