

Действительно, условия (1.3), достаточные для справедливости приближения Буссинеска, в расчетах не всегда были выполнены. Так, $\alpha > 1$ для $F > 1,13$ в случае вариации c и для $F > 1,08$ в случае вариации h . О применимости модели при несоблюдении условий (1.3) можно судить по сопоставлению с экспериментом [4] и с расчетами по более общей модели потенциального течения идеальной жидкости [5, 6], где хотя и обнаружено некоторое расхождение количественных результатов, растущее по мере увеличения мощности источника возмущения, однако не выявлено каких-либо разногласий качественного характера (величина α при этом достигала 0,7). Отметим также, что в рамках другой приближенной модели (уравнений Грина — Нагди) генерация солитонов рассчитана вплоть до $F_h = 1,4$ [2], при этом не отмечено каких-либо причин ее отсутствия при $F_h > 1,4$.

Таким образом, думается, что возможность генерации солитонов с амплитудами и скоростями, заметно превышающими предельные значения этих же параметров стационарных волн, объясняется не столько слабонелинейным характером используемой модели, сколько природой явления, а именно наличием вынуждающей силы, делающей генерируемые солитоны существенно несвободными. Однако при более общем моделировании, по-видимому, следует ожидать некоторого снижения верхней границы допустимых значений F_h по причине потери устойчивости волн большой амплитуды (развитие неустойчивости волн с увеличением мощности источника возмущения отмечено в эксперименте [4] и наблюдалось автором при выполнении численных расчетов задачи в рамках потенциальной модели [5, 6]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Wu D. M., Wu T. Y. Three-dimensional nonlinear long waves due to moving surface pressure // 14th Symp. on Naval Hydrodynamics, Michigan, 1982: Proc.
2. Ertekin R. C., Webster W. C., Wehausen J. V. Waves caused by a moving disturbance in a shallow channel of finite width // J. Fluid Mech.— 1986.— V. 169.— P. 275.
3. Wu T. Y. Generation of upstream advancing solitons by moving disturbances // J. Fluid Mech.— 1987.— V. 184.— P. 75.
4. Lee S. J., Yates G. T., Wu T. Y. Experiments and analyses of upstream-advancing solitary waves generated by moving disturbances // J. Fluid Mech.— 1989.— V. 199.— P. 563.
5. Протопопов В. Е. Numerical investigation of soliton generation by a moving region of surface pressure // Intern. Series Num. Math.— 1991.— V. 99.— P. 347.
6. Протопопов В. Е. Численное моделирование явления генерации солитонов движущейся областью поверхностного давления // ПМТФ.— 1991.— № 3.

г. Новосибирск

Поступила 4/IV 1991 г.,
в окончательном варианте — 16/VI 1992 г.

УДК 534.2 : 532

С. Г. Миронов

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ НАТЕКАНИИ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ НА КОНЕЧНУЮ ПРЕГРАДУ

Автоколебательное взаимодействие сверхзвуковых газовых струй с преградами изучается с конца 20-х годов [1] и нашло широкое применение в практике. Однако вопрос о механизме поддержания колебаний до сих пор недостаточно ясен. Фактически все гипотезы, претендующие на объяснение этого явления, — это гипотезы о каналах прямой и обратной связи автоколебательной системы струя — преграда. Их можно разделить на две основные группы: обратную связь осуществляют волны

в ударном слое между преградой и центральным скачком уплотнения [2—4]; обратную связь осуществляют звуковые волны, распространяющиеся в окружающей струю среде [5]. Упомянутые модели в равной мере логично описывают наблюдаемые на теневых картинах движения элементов течения и с достаточной точностью определяют частоты пульсаций, однако не позволяют найти область существования колебаний и объяснить скачки их частоты. В [6] была предпринята попытка, не противопоставляя модели друг другу, найти области их применимости. На основе анализа шлирен-снимков процесса взаимодействия слабонедорасширенных струй с преградами показано, что внешняя обратная связь доминирует, когда диаметр преграды d_n в 4 и более раз превышает диаметр выходного сечения сопла d_a ($d_n/d_a > 4$), а внутренняя доминирует при условии $d_n/d_a < 2$, физический смысл полученного критерия не объясняется. Вопрос о роли каналов обратной связи чрезвычайно важен как с точки зрения модельных представлений процесса автоколебаний, так и при практическом использовании технологий и механизмов, основанных на этом явлении.

В данной ситуации естественным шагом является проверка моделей путем анализа влияния изменений внешних условий на амплитудно-частотные характеристики автоколебаний. Такие исследования выполнены в [7—9], где цепь внешней обратной связи разорвана путем экранирования области корня струи [7, 8] и помещения системы струя — преграда в коаксиальный спутный сверхзвуковой поток [9]. В [7—9] получены противоположные результаты, недостаток этих работ в единичности измерений, выборе не самых оптимальных для проверки моделей экспериментальных методов и параметров взаимодействия.

В [4, 10] выполнены численные эксперименты, содержащие: исключение из счета внешней области струи, изменение температуры газа в окружающей среде в 1,5 раза, постановку звукопоглощающего экрана вне струи, придание внешней к струе среде сверхзвукового спутного движения. Во всех случаях не происходило изменения характера и амплитуды колебаний.

В настоящей работе экспериментально изучено влияние скорости прохождения акустических волн от преграды к соплу и их интенсивности вблизи кромки сопла на амплитудно-частотные и фазовые характеристики автоколебаний при натекании недорасширенной воздушной струи на торец цилиндра конечных размеров. Полученные результаты проанализированы с позиции двух основных механизмов поддержания автоколебаний в таких струйных системах.

1. Схема эксперимента показана на рис. 1. Недорасширенная струя холодного воздуха истекала из конического звукового сопла с острыми кромками 1 (рис. 1, а) диаметром $d_a = 10^{-2}$ м и натекала на плоский торец цилиндра 2 с относительным диаметром $\bar{d}_n = d_n/d_a = 2,3$. Степень нерасчетности струи n изменялась от 5 до 30, расстояние сопло — преграда $\bar{x}_n = x_n/d_a$ в процессе эксперимента могло изменяться в широких пределах.

Измерения пульсаций давления производились двумя пьезокерамическими датчиками типа И4131 с диаметром приемной части $3 \cdot 10^{-3}$ м и граничной частотой 60 кГц. Один из них устанавливался в центре преграды, а другой — вблизи кромки сопла. Сигналы датчиков и информация о давлении в форкамере и положении преграды записывались на магнитограф Н067 в полосе частот до 20 кГц. При обработке сигналов определялись автоспектры пульсаций и взаимно корреляционные функции первых гармоник для нахождения сдвига фаз сигналов.

Интенсивность акустических пульсаций у кромки сопла изменялась от 0 до 30 дБ путем перемещения звукоотражающего диска 4 вдоль оси сопла. Использовались диски диаметром $6 \cdot 10^{-2}$, $9,5 \cdot 10^{-2}$, $1,15 \cdot 10^{-1}$ м для достижения наибольшей глубины модуляции пульсаций в зависимости от частоты колебаний, диапазон перемещений дисков составлял $4 \div 12$ калибров выше среза сопла по потоку. Таким образом была реализована

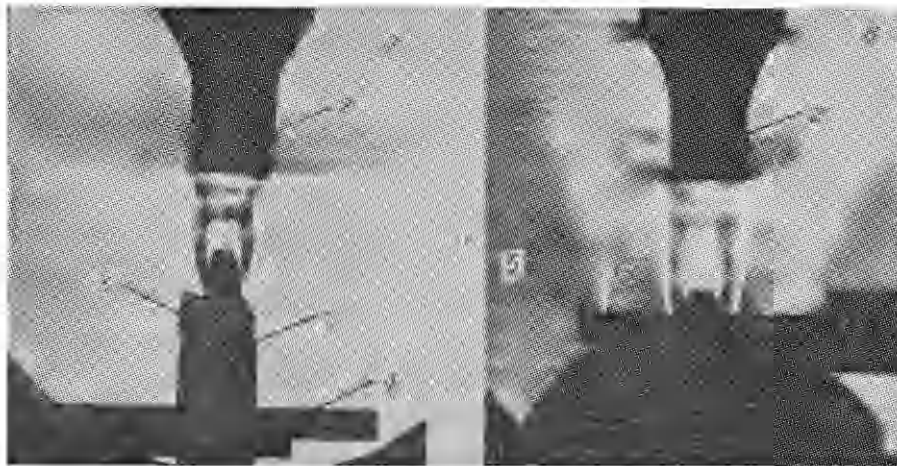


Рис. 1

возможность плавного изменения эффективности цепи обратной связи с меньшим, чем в [7, 8], возмущением струйного течения.

Скорость прохождения сигналов по цепи внешней обратной связи плавно изменялась с увеличением скорости дозвукового коаксиального спутного потока, в который помещалась система струя — преграда (рис. 1, б). Спутный поток истекал из сопла обдува 5 с относительным диаметром 7 калибров центрального сопла. Диапазон значений числа Маха спутного потока составлял $M_\infty = 0 \div 0,7$. Срез сопла центральной струи располагался на уровне среза сопла обдува. Для предотвращения отрыва потока внешний контур центрального сопла имел плавный выход на заострение кромок. Кроме того, датчик 3 в этом случае располагался перед областью поджатия сопла обдува на треть диаметра сопла обдува выше по потоку для уменьшения возмущения им спутного потока. Измерения давления полного напора показали, что азимутальная неоднородность потока обдува не превышает 5 %. Эксперименты в дозвуковом потоке позволяют проследить генезис измерений и показать связь явлений в отличие от [9], где связь с исходным процессом трудно доказать.

2. На рис. 2 кривой 1 (для $M_\infty = 0$) показана экспериментально полученная область существования автоколебаний в отсутствие сопла обдува и звукоотражающего диска. Здесь же представлены изолинии равных амплитуд пульсаций давления на преграде. Единица соответствует уровню пульсаций 192 ÷ 194 дБ.

При перемещении звукоотражающего диска вдоль оси сопла изменяется уровень пульсаций давления у кромки сопла, в частности первой гармоники, что связано с интерференцией падающих и отраженных от диска звуковых волн. Обнаружено, что уровень первой гармоники пульсаций на преграде $\Delta L_{\text{п}}$ зависит как от уровня пульсаций на первой гармонике у кромки сопла $\Delta L_{\text{а}}$, так и от положения точки $(n, \bar{x}_{\text{п}})$ в области существования автоколебаний (рис. 2). На краях области связь изменений сильнее, в центре слабее. Если ввести коэффициент пропорциональности изменения η ($\Delta L_{\text{п}} = \eta \Delta L_{\text{а}}$, $\Delta L_{\text{а}}$, $\Delta L_{\text{п}}$ — логарифмические единицы), то его распределение по области существования можно представить в виде изолиний равной величины η (рис. 3). Изолинии получены путем аппроксимации данных измерений, выполненных с шагом 2,0 по n и 1,0 по $\bar{x}_{\text{п}}$. Более того, наличие звукоотражающего диска несколько расширяет область существования автоколебаний. Штриховкой на рис. 3 показана область 60%-го доверительного интервала, где зарегистрированы колебания, возникающие при перемещении диска и лежащие вне границ области, приведенной на рис. 2. Для этих колебаний $\eta \approx 1$. В центре области существования $\eta < 0,1$, так как уровень пульсаций у кромки соп-

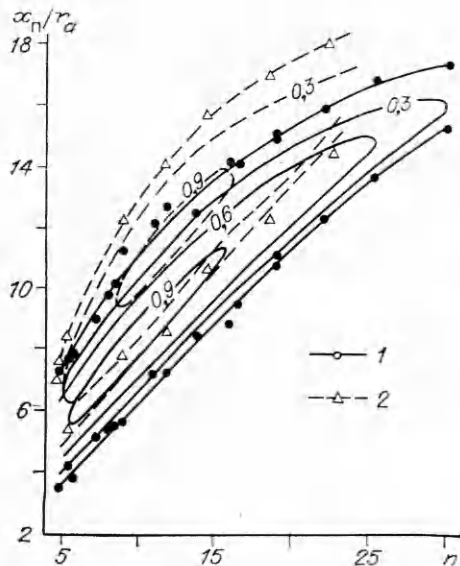


Рис. 2

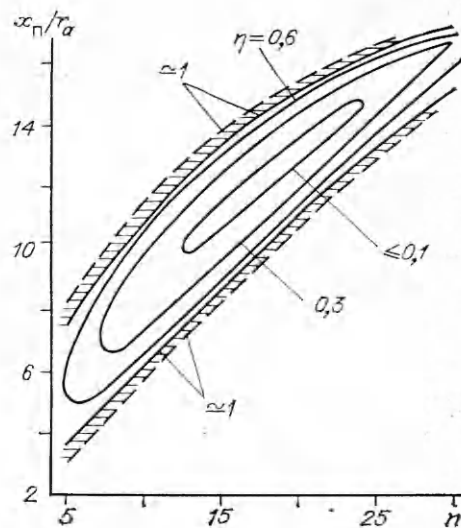


Рис. 3

ла достаточно высок (≈ 170 дБ в центре области автоколебаний) для того, чтобы интерференционное поле, проникающее к преграде, вызывало дополнительные изменения уровня пульсаций на преграде порядка 2 дБ.

3. Обдув системы струя — преграда дозвуковым спутным потоком смещает область существования автоколебаний в сторону больших x_n (см. рис. 2, кривая 2 для $M_\infty = 0,62$). При этом смещение границ области происходит пропорционально значению x_n каждой точки границы. Относительное смещение границ можно описать следующими эмпирическими зависимостями:

$$(\bar{x}_n/\bar{x}_n^0) \simeq (1 + M_\infty^{2,9}) \pm 0,06$$

для нижней границы,

$$(3.1) \quad (\bar{x}_n/\bar{x}_n^0) \simeq (1 + 0,47M_\infty^{2,7}) \pm 0,03$$

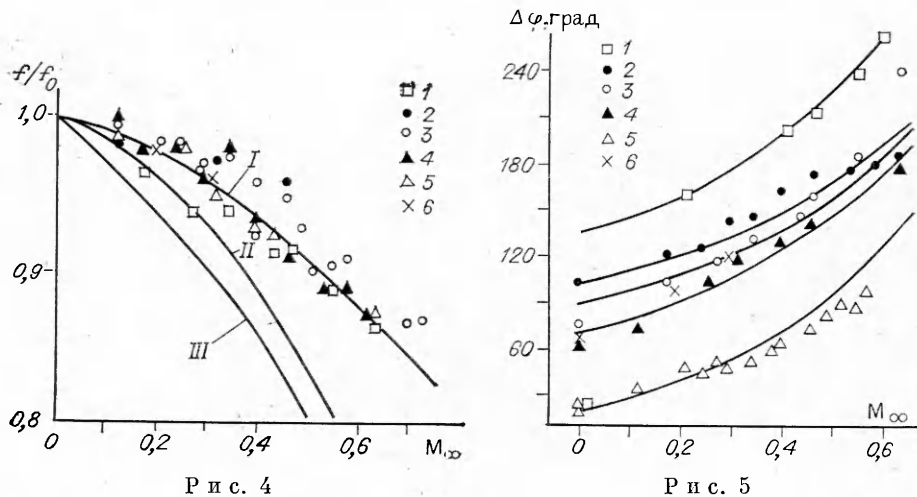
для верхней границы области автоколебаний. С увеличением M_∞ потока обдува абсолютный максимум интенсивности пульсаций давления на преграде в пределах точности измерений не изменяется и близок к 192 дБ, форма и положение изолиний равной интенсивности также мало меняются и подобны приведенным на рис. 2.

На рис. 4 представлены результаты измерений частоты пульсаций давления на преграде при увеличении M_∞ потока обдува. Здесь приведены данные для условий истечения, попадающих в зону пересечения областей автоколебаний, для $M_\infty = 0$ и 0,62: точки 1 отвечают $n = 9,5$; $\bar{x}_n = 7,8$; 2 — 11; 11; 3 — 12,2; 10,7; 4 — 11,5; 10; 5 — 9,5; 9; 6 — 14,5; 10,7. Наблюдаемое изменение относительной частоты пульсаций можно аппроксимировать зависимостью (кривая 1 на рис. 4)

$$f/f_0 \simeq (1 - M_\infty)^{0,14}.$$

На рис. 5 показаны результаты измерения сдвига фазы между первыми гармониками пульсаций давления на преграде и у сопла в зависимости от M_∞ . Данные по фазе скорректированы с учетом расстояния от среза сопла до датчика и изменения осевой скорости потока обдува на участке поджатия сопла. Условия истечения соответствуют рис. 4. Следует отметить достаточно большую величину набега фазы при изменении скорости спутного потока, превышающую 90° .

4. Проанализируем полученные результаты с позиций основных моделей процесса. На рис. 4 приведены зависимости изменения относи-



тельной частоты колебаний от M_∞ , рассчитанные по моделям с внешней обратной связью ([5 и 6] — кривые *II* и *III*). Расчет выполнен при $n = 11$, для скорости конвекции возмущений на границе струи u_k использовано выражение [11]

$$(4.1) \quad u_k \approx 0,7 u_r + 0,3 u_\infty,$$

где u_r — скорость на границе струи [5]; u_∞ — скорость спутного потока. Величина среднего положения центрального скачка уплотнения, используемая в расчете, оценивалась по данным [12]. Согласно моделям [2—4], частота колебаний не должна зависеть от внешних условий, а полностью определяется условиями в ударном слое перед преградой. Сравнение с экспериментом показывает, что имеет место качественное совпадение с моделями [5, 6], но количественное расхождение достаточно велико как для одной, так и для другой модели.

На рис. 5 представлены расчетные зависимости изменения разницы фаз для первой гармоники пульсаций давления на преграде и у сопла в предположении, что фаза меняется только в результате замедления скорости движения звуковых волн во встречном потоке и наблюдаемого изменения частоты колебаний (рис. 4). При расчете в качестве характерной длины использовано расстояние от сопла до среднего положения центрального скачка уплотнения [12], так как именно на этом участке внешний поток воздействует на скорость прохождения звуковых волн к соплу. Удовлетворительное качественное и количественное совпадение расчетных кривых и экспериментальных точек подтверждает исходное предположение. В рамках модели с внешней обратной связью большая величина изменения фазы, полученная в измерениях, предполагает наличие механизма компенсации роста фазы в колебательном цикле, так как сумма фаз на всех его отрезках должна быть равна 360° . Единственный механизм уменьшения фазы связан с увеличением скорости конвекции возмущений на границе струи (см. (4.1)). Однако оценки показывают его явную недостаточность, что и приводит к падению частоты (кривые *II*, *III* на рис. 4). Другим возможным каналом компенсации роста фазы было бы уменьшение расстояния сопло — преграда. При этом сокращается путь прохождения сигнала по цепи обратной связи и части пути прямой связи по границе струи. Это должно приводить к сдвигу области существования автоколебаний в сторону меньших x_n . В эксперименте наблюдается обратная картина (см. (3.1)).

С другой стороны, в рамках модели с внутренней обратной связью распределение фаз по участкам колебательного цикла не зависит от внешних условий и допускает любое изменение фазы пульсаций у кромки сопла. Сдвиг области существования автоколебаний в сторону больших x_n

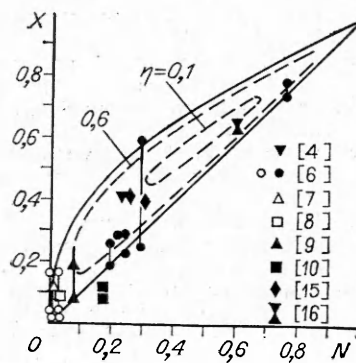
можно объяснить увеличением продольного размера первой ячейки струи в спутном потоке. Рост \bar{x}_n для верхней границы зоны (3.1) хорошо согласуется с предсказанным в [13] увеличением относительной длины ячеек волновой структуры струн l/l_0 в дозвуковом спутном потоке, аппроксимируемым выражением

$$l/l_0 \approx 1 + 0,375 M_\infty^{2,5}.$$

Таким образом, можно утверждать, что поведение разности фаз и положение зоны автоколебаний с ростом скорости спутного потока в большей степени согласуются с моделями [2—4].

Согласно модели с внешней обратной связью, уровень пульсаций давления у кромки сопла должен оказывать существенное влияние на интенсивность колебаний, так как им определяется степень эффективности цепи обратной связи. В модели с внутренней связью этот параметр не влияет на формирование цикла колебаний. Данные, приведенные на рис. 3, можно интерпретировать в этом случае как проявление доминирующего влияния первого механизма на границах области автоколебаний и второго в центре. В остальных случаях в колебаниях участвуют оба канала обратной связи. С другой стороны, для сильнонелинейных колебаний, характерных для центральных участков зоны существования, может не выполняться условие пропорциональности начальных и конечных возмущений в автоколебательной системе — даже малые возмущения могут вызвать максимальные пульсации на преграде (релаксационные колебания). В связи с этим достигнутая в эксперименте величина подавления пульсаций у кромки сопла 30 дБ может оказаться недостаточной для разрыва цепи внешней обратной связи, что не позволяет однозначно определить основной механизм поддержания колебаний в струйной системе.

Результаты настоящей работы могут быть непротиворечиво сопоставлены с результатами [4, 6—10] с помощью анализа их места на обобщенной зоне существования автоколебаний [14]. На рис. 6 сплошной линией приведена обобщенная зона с нанесенными на ней параметрами взаимодействия струи с преградой из [4, 7—10] и работ, используемых в обзоре [6]; нанесены также данные [15, 16], где выполнены расчеты по моделям с каналом внутренней обратной связи. Здесь X и N — соответственно обобщенные расстояние сопло — преграда и степень нерасчетности струи. Светлыми значками обозначены результаты исследований, в которых доказывается доминирующее влияние канала внешней обратной связи, темными — внутренней. Для сравнения на рис. 6 показаны изолинии $\eta = 0,1$ и $0,6$ рис. 3. Видно, что канал внешней связи проявляет себя на периферии зоны, а внутренней — ближе к центральным областям зоны автоколебаний. Это вполне согласуется с распределением коэффициента η по зоне и свидетельствует о существовании характерных областей применимости для каждой модели процесса.



Р и с. 6

ЛИТЕРАТУРА

1. Hartmann J., Trolle B. A new acoustic generator. The air-jet generator // J. Scient. Instrum.— 1927.— V. 4, N 1.
2. Набережнова Г. В., Нестеров Ю. Н. Неустойчивое взаимодействие расширяющейся сверхзвуковой струи с преградой // Тр. ЦАГИ.— 1976.— Вып. 1765.
3. Семилетенко Б. Г., Собколов Б. Н., Усков В. Н. Схема ударно-волновых процессов при неустойчивости взаимодействия струи с преградой // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1973.— № 13, вып. 3.
4. Усков В. Н., Цымбалов В. В., Цымбалова Е. Н. Численное решение задачи о нестационарном взаимодействии сверхзвуковой струи с преградой // Моделирование в механике/АН СССР, Сиб. отд-ние, ВЦ. ИТПМ.— 1987.— Т. 1(18), № 6.
5. Глазнев В. Н., Демин В. С. Полуэмпирическая теория генерации дискретных то-

- нов сверхзвуковой недорасширенной струей, натекающей на преграду // ПМТФ.— 1976.— № 6.
6. Powell A. The sound producing oscillations of round underexpanded jets impinging on normal plates // J. Acoust. Soc. Amer.— 1988.— V. 83, N 2.
 7. Глазнев В. Н., Демин В. С., Желтухин Н. А. К теории струйного генератора Гартмана // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1973.— № 13, вып. 3.
 8. Глазнев В. Н. О механизме обратной связи в автоколебаниях при натекании сверхзвуковой недорасширенной струи на плоскую преграду // ПМТФ.— 1991.— № 4.
 9. Горшков Г. Ф., Усков В. Н., Ушаков А. П. Автоколебательный режим взаимодействия недорасширенной струи с преградой при наличии сверхзвукового спутного потока // ПМТФ.— 1991.— № 4.
 10. Альбазаров Б. Ш. Численное моделирование взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Л., 1991.
 11. Tam C. Forward flight effects on broad-band shock associated noise of supersonic jets.— N. Y., 1989.— (Pap./AIAA; N 89-1088).
 12. Остапенко В. А., Солотчин А. В. Силовое воздействие сверхзвуковой недорасширенной струи на плоскую преграду // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1974.— № 13, вып. 3.
 13. Morris J. P. A note on the effect of forward flight on shock spacing in circular jets // J. Sound and Vibr.— 1988.— V. 121, N 1.
 14. Остапенко В. А., Солотчин А. В. О критериях моделирования поля течений сверхзвуковой струи при наличии преграды // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1974.— № 8, вып. 2.
 15. Рудаков А. И., Рудакова Г. М. Численное моделирование нестационарного обтекания преграды сверхзвуковым струйным потоком // Сверхзвуковые газовые струи.— Новосибирск: Наука, 1983.
 16. Набережнова Г. В., Нестеров Ю. Н. Неустойчивость течения в области взаимодействия недорасширенной струи с преградой // Учен. зап. ЦАГИ.— 1982.— Т. 13, № 4.

г. Новосибирск

Поступила 27/XII 1991 г.

УДК 532.582

В. Л. Сенницкий

ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ОДНОНАПРАВЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ СЖИМАЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА В ВИБРИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

В [1] представлены экспериментальные результаты, подтверждающие существование явления преимущественно однонаправленного движения газового пузыря в вибрирующей жидкости. Это явление состоит в том, что газовый пузырь в жидкости, находящейся в замкнутом сосуде, вследствие заданных согласованных колебаний и деформаций сосуда совершает перемещение в заданном направлении (в положительном или в отрицательном направлении оси, вдоль которой происходят колебания сосуда). В настоящей работе представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие, что в таких условиях перемещение в заданном направлении совершает также сжимаемое (в сравнении с жидкостью) твердое тело.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Замкнутый сосуд 1 заполнен жидкостью (водой) 2, в которой находится сжимаемое

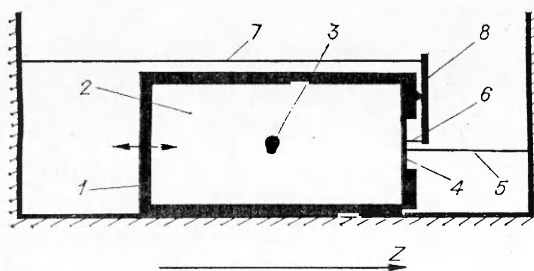


Рис. 1

твердое тело (эластичный баллон с грузом, содержащий в себе воздух) 3. Плотность тела близка к плотности жидкости. Сосуд образован эластичной мембраной 4 и жестко скрепленными друг с другом стенками. Сосуд может колебаться вдоль горизонтальной оси Z и при этом деформироваться: сжиматься и разжи-