АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXVII 1981 Вып. 3

УДК 533.6.011.72

КОЛЕБАНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ЕЕ ОТ РЕЗОНАТОРА

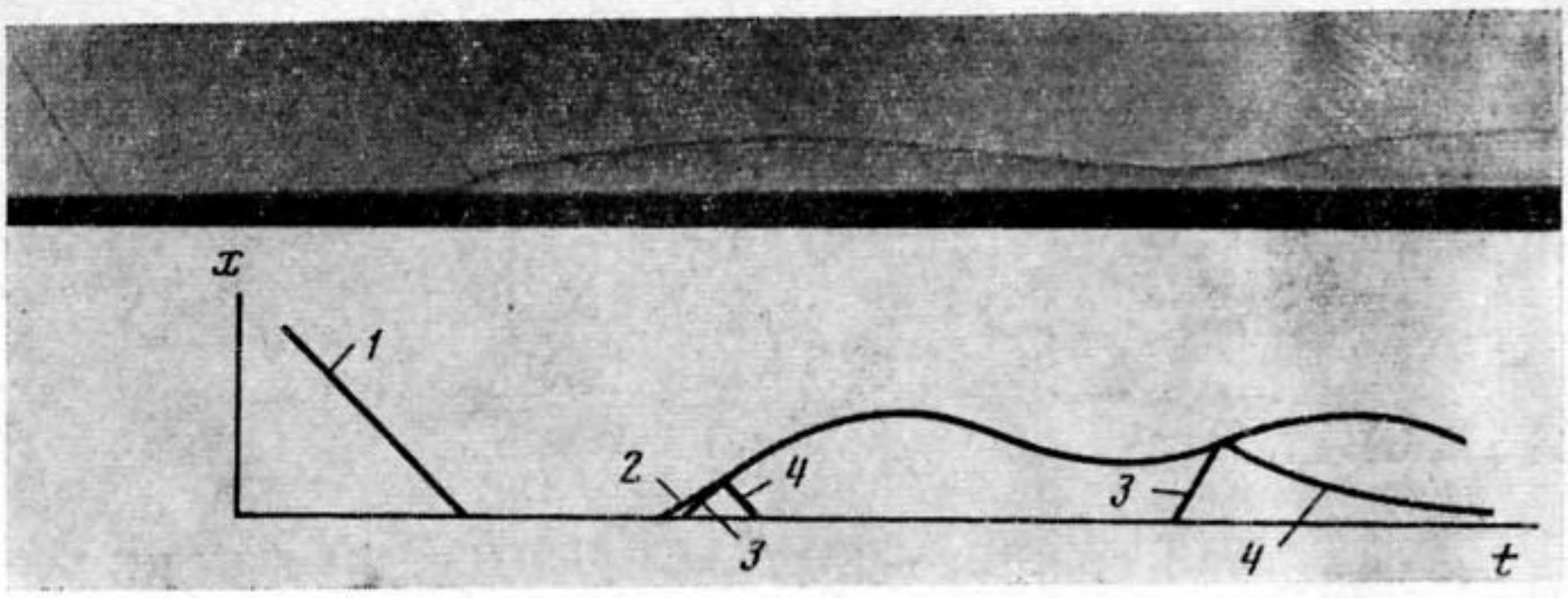
Знаменская И. А., Ибрагим М. А., Шугаев Ф. В.

Исследованы затухающие колебания головной ударной волны перед резонатором, возникающие при падении на него плоской ударной волны с числом Маха 2,2÷5,5. Дается качественное объяснение наблюдаемых явлений.

При падении плоской ударной волны на препятствие происходит переход к обтеканию его потоком газа, движущимся за фронтом ударной волны. Если поперечные размеры препятствия конечны, а поток за падающей волной является однородным и сверхзвуковым, то возникает установившееся обтекание тела с головной ударной волной.

В последние годы в ряде экспериментальных работ наблюдались пульсации течения при сверхзвуковом обтекании резонансных трубок [1—3]. В настоящей работе показано, что при отражении ударной волны от резонатора, обращенного полостью навстречу потоку, в процессе перехода к установившемуся обтеканию модели головная волна совершает регулярные затухающие колебания. Обнаружена вторичная ударная волна, которая играет определяющую роль в возникновении этих колебаний.

В экспериментах исследовалось отражение плоской ударной волны от трехмерного и двумерного резонатора. Опыты проведены в ударной трубе сечением 28,5×28,5 мм^2. В рабочей части трубы параллельно набегающему потоку крепились модели резонаторов двух видов: 1) модель трехмерного резонатора — резонансная цилиндрическая трубка с одним открытым концом, имеющим острые кромки; внутренний диаметр d=6 мм, толщина стенок 1 мм, глубина цилиндрической полости менялась от 0 до 25 мм; 2) модель двумерного резонатора — две параллельные пластины с острыми кромками шириной 28,5 мм, укрепленные на вкладыше толщиной 3÷5 мм; глубина h такого резонатора менялась от 0 до 7 мм. Числа Маха падающей волны составляли M=2,2÷5,5. Толкающим газом служил гелий или азот, рабочим — воздух. Были получены последовательные теневые и интерференционные кадры процесса взаимодействия ударной волны с резонатором. Источником света служил оптический квантовый генератор на рубине с модулированной добротностью. С помощью фоторегистратора ЖФР и теневого прибора ИАБ-451 были сняты временные развертки процесса. Типичная развертка отражения ударной волны от цилиндрического резонатора приведена на фиг. 1 (M=4,45, h=10 мм). Падающая ударная волна (*1*) входит в полость резонатора. Геометрия трехмерной модели не позволяет исследовать процессы, происходящие внутри резонатора. После выхода из полости отраженная волна (*2*) совершает затухающие колебания около некоторого положения равновесия. Через 2—3 колебания происходит выход течения на стационарный режим. На фиг. 2 приведена экспериментальная зависимость времени установления T стационарного обтекания от безразмерной глубины полости $H=h/d$ для числа M=5. Видно, что время установления линейно зависит от глубины. После прихода



Фиг. 1. Временна́я развертка ударной волны, отраженной от цилиндрического резонатора

к модели контактной поверхности, разделяющей области толкающего и толкаемого газа в ударной трубе, колебания возобновляются. Амплитуда колебаний головной ударной волны перед цилиндрическим резонатором возрастает с увеличением глубины полости при постоянном M.

Для двумерного резонатора амплитуда колебаний волны значительно меньше, чем в осесимметричном случае, затухание происходит через 1—1,5 периода.

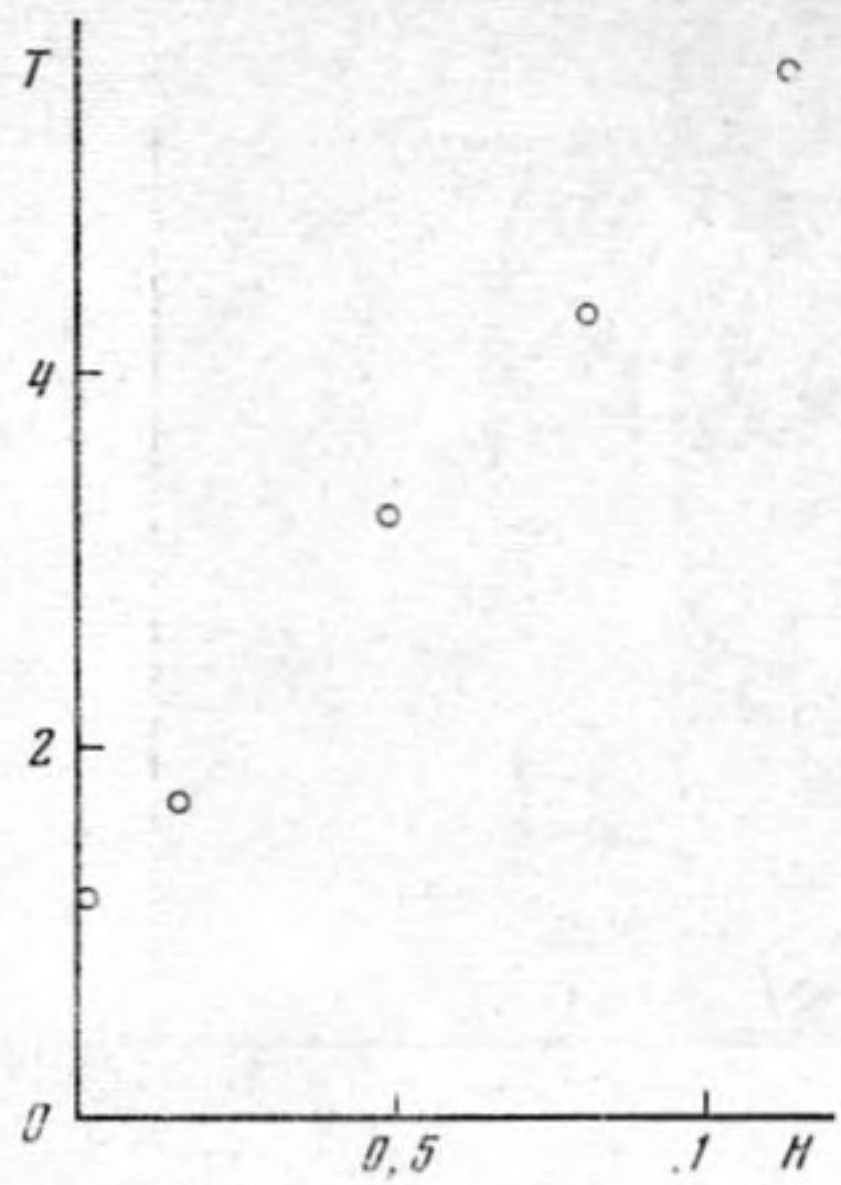
На фиг. 3 показаны экспериментальные значения частот колебаний f ударной волны в зависимости от глубины резонатора и числа Маха. Кривые соответствуют расчету по формуле для четвертьволнового резонатора [4] с учетом изменения параметров газа в ударном слое:

$$f=\{2D[1/(\bar{v}+\bar{c})+1/(\bar{c}-\bar{v})]+4h/c_3\}^{-1},$$

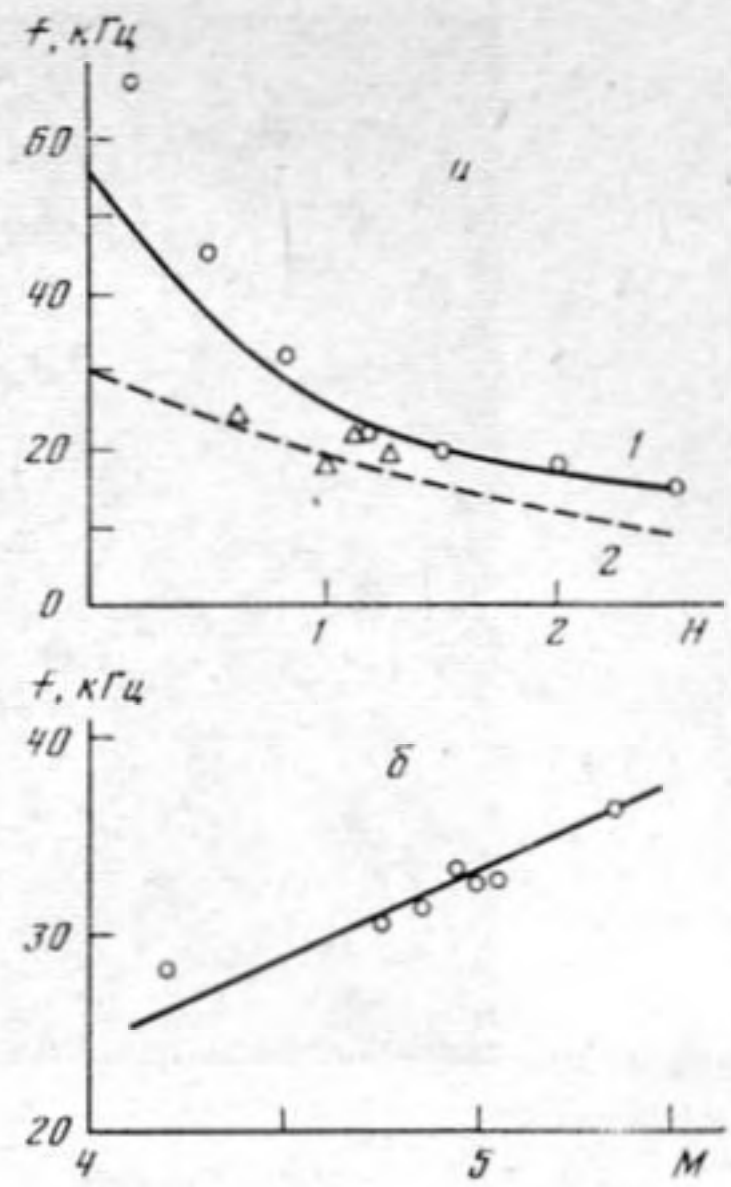
где D — средняя величина отхода ударной волны от резонатора, c — скорость звука, v — скорость потока за стационарной волной, $\bar{c}=(c_2+c_*)/2$, $\bar{v}=v_2/2$. Здесь индекс 2 относится к значениям параметров непосредственно за ударной волной, соответствующей сверхзвуковому установившемуся обтеканию резонатора, звездочкой помечено значение параметра в точке торможения, индекс 3 относится к значению за волной, отраженной от плоской стенки.

Максимальное изменение скорости головной волны за период составляет 200 м/с. Это соответствует изменению давления за волной приблизительно на 30%. При увеличении глубины резонатора ($H>3$) регулярность колебаний нарушается. На фиг. 4 показана отраженная от дна модели ударная волна в случае двумерного (h=6,2 мм) и трехмерного (h=7 мм) резонаторов. На первом снимке отраженная волна находится внутри модели, на втором — она уже отошла на значительное расстояние от резонатора. На обоих снимках видна вторичная ударная волна, движущаяся за отраженной. След вторичной волны имеется и на развертке (линия *3* на фиг. 1). Во втором периоде интенсивность вторичной волны значительно слабее. В результате догонного взаимодействия вторичной волны с головной образуется новая ударная волна и контактная поверхность (линия *4* на фиг. 1). Скорость отраженной от дна резонатора ударной волны в момент выхода из полости не зависит от глубины полости, зависимость от глубины начинает резко проявляться через некоторое время после выхода из резонатора — после догонного взаимодействия. При большой глубине выемки догонное взаимодействие волн происходит до выхода отраженной волны из полости. Этим, очевидно, объясняется нарушение регулярности колебаний при $H>3$.

Для качественного описания процесса колебаний необходимо знать закон отражения слабых возмущений от фронта ударной волны [5, 6]. Свяжем систему координат с газом перед волной. Если в момент времени $t=$



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Зависимость времени установления стационарного обтекания от глубины цилиндрического резонатора

Фиг. 3. Зависимость частоты колебаний от глубины резонатора (*а*), M=4,8 и от числа Маха падающей волны (*б*), h=5 мм. *1* – трехмерный резонатор, *2* – двумерный резонатор

=0 в точке $x=0$ плоскую ударную волну со стороны сжатого газа догоняет одномерное возмущение (p – давление)

$$\frac{\delta p_2(x,t)}{p_1}=\varphi(a-mM_0c_1t),\qquad x=a\frac{l}{(\gamma+1)M_0^2}+\frac{2(M_0^2-1)}{(\gamma+1)M_0}c_1t,$$

$$m=\sqrt{g/l},\quad g=2\gamma M_0^2-\gamma+1,\quad l=(\gamma-1)M_0^2+2,$$

$$\delta p_2=p_2-p_{20},\quad p_{20}=p_2(0,0),$$

то изменение давления в отраженной волне равно

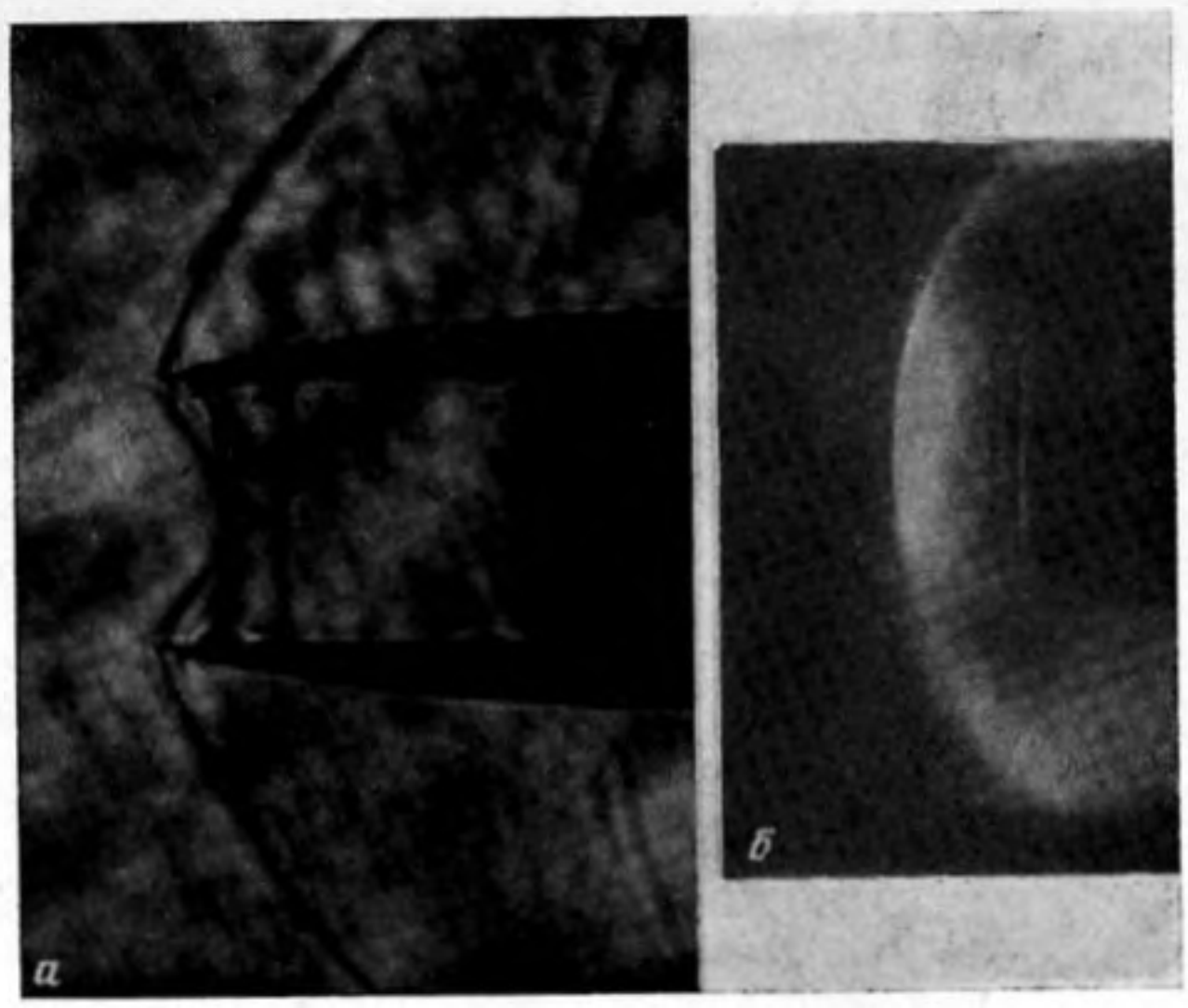
$$(\delta p_2/p_1)_0=k\varphi(\xi),\quad \xi=n(a+mM_0c_1t),$$

$$k=(M_0^2-1)^2[2(\gamma-2)M_0^2+\gamma-1]/g[M_0^2(1+2/m)+1]^2,$$

$$n=(1-m)/(1+m).$$

Здесь индекс 0 соответствует числу Маха невозмущенной ударной волны, индекс 1 относится к состоянию перед волной. Коэффициент отражения k при $\gamma\leqslant{}^5/_3$ отрицателен, т. е. волна разрежения отражается в виде волны сжатия и наоборот. Пусть $2>\gamma>{}^5/_3$. В этом случае $k=0$ при $M_0=q=\sqrt{(\gamma-1)/[2(2-\gamma)]}$ (отраженная волна отсутствует), $k>0$ при $M_0<q$, $k<0$ при $M_0>q$. При $\gamma\geqslant2$ коэффициент отражения положителен для всех значений числа M_0 волны.

В целом картину течения после отражения ударной волны от резонатора можно представить следующим образом. Возмущения в потоке за падающей ударной волной формируются на острых кромках модели в виде волн сжатия. Догоняя друг друга, они образуют новую ударную волну, которая видна на снимках. Вторичная ударная волна движется вслед за отраженной со скоростью, близкой к звуковой, и догоняет ее через некоторое время после выхода из резонатора. При этом образуется новая ударная волна; ее скорость, очевидно, при прочих равных условиях зависит от



Фиг. 4. Отраженная и вторичная ударные волны при выходе из трехмерного (*а*) и двумерного (*б*) резонаторов

интенсивности второй волны, т. е. от глубины резонатора. Это объясняет зависимость амплитуды колебаний от глубины выемки. Волны разрежения, распространяющиеся от кромок модели, замедляют головную ударную волну. После взаимодействия с волной разрежения, возникшей при слиянии ударных волн и затем отразившейся от дна резонатора, головная ударная волна проходит положение, соответствующее стационарному обтеканию, а потом снова начинает удаляться от модели. Волна разрежения отражается от ударной волны в виде волны сжатия, профиль ее при движении внутри резонатора становится все круче, затем она вновь догоняет головную волну. Малое значение коэффициента отражения вызывает быстрое затухание колебаний.

Таким образом, решающую роль в возникновении обнаруженных колебаний ударной волны после отражения ее от резонатора играет догонное взаимодействие вторичной ударной волны с головной волной перед резонатором.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Shigemi M., Koyama H., Aihara J.* A note on oscillating shock wave. Some experiments with a resonance tube.— Trans. Japan. Soc. Aero. Space. Sci., 1976, v. 19, № 44, p. 70—80.
2. *Елисеев Ю. Б., Черкез А. Я.* Экспериментальное исследование аномального аэродинамического нагрева тел с глубокой полостью.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1978, № 1, с. 113—119.
3. *Антонов А. И., Шалаев С. П.* Экспериментальное исследование нестационарного течения в полостях, обтекаемых сверхзвуковым потоком.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 5, с. 180—183.
4. *Богачевский, Костов.* Сверхзвуковое обтекание выпуклых и вогнутых тел при наличии излучения и абляции.— Ракетная техника и космонавтика, 1972, т. 10, № 8, с. 64—74.
5. *Конторович В. М.* Отражение и преломление звука на ударных волнах.— Акуст. ж., 1959, т. 5, № 3, с. 314—323.
6. *Сислян Ж. С.* О взаимодействии возмущений с ударной волной при одномерном неустановившемся движении газа.— Прикл. мех. и техн. физ., 1963, № 3, с. 153—155.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию
6.V.1980