

ОСЛАБЛЕНИЕ УВ СЛОЯМИ ОДНОРОДНОЙ И НЕОДНОРОДНОЙ МОНО- И ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ

В рамках методов механики гетерогенных сред выполнено численное исследование процесса ослабления УВ экранирующими облаками однородной и неоднородной моно- и полидисперсной (двухфракционной) газовзвеси. Установлено, что при прочих одинаковых условиях наибольший и наименьший эффекты гашения УВ достигаются слоями монодисперсной газовзвеси с убывающим и возрастающим законами изменения начальной концентрации частиц. Показано, что слои однородной монодисперсной газовзвеси вызывают большее ослабление УВ, чем слои однородной двухфракционной.

Для ряда отраслей современной техники и технологии, связанного с использованием взрывных процессов, большой практический интерес представляет проблема ослабления ударных или детонационных волн в газах. В частности, интерес к этой проблеме обусловлен с точки зрения безопасности труда при проведении взрывных работ, защиты технологического оборудования и др. Одно из возможных технических решений проблемы подавления взрывных волн в газах — использование экранирующих слоев газовзвеси (пылевых или капельных завес).

В работе [1] приводятся результаты численного исследования процесса ослабления УВ экранирующими слоями однородной монодисперсной газовзвеси. В [2] обсуждается возможность описания затухания взрывных волн во взвесах тяжелых крупных частиц в рамках уравнений обычной газовой динамики с использованием предположения о вторичности в пространстве дисперсных частиц. В данной работе, которая логически продолжает исследования [1, 2], сообщаются результаты численного анализа влияния неоднородности и полидисперсности взвеси на снижение максимального (пикового) давления на стенке преграды за отраженными УВ.

Основные уравнения. Пусть имеется смесь газа с твердыми химическими инертными взвешенными частицами. Для описания ее движения используются обычные для механики сплошных многофазных сред допущения [3]: расстояния, на которых параметры течения меняются существенно, много больше характерных размеров частиц и расстояний между ними; частицы имеют сферическую форму; смесь монодисперсная, если размеры всех частиц одинаковы, и полидисперсная (двухфракционная), если размеры частиц одной фракции d_2 и другой — d_3 ; эффекты вязкости теплопроводности существенны лишь в процессах межфазового взаимодействия; деформация, дробление, испарение и столкновение частиц отсутствуют; изменение внутренней энергии смеси, обусловленное работой сил межфазного трения целиком осуществляется через несущую фазу (газ). При принятых допущениях система уравнений одномерного нестационарного движения бесстолкновительной моно- и полидисперсной газовзвесей может быть представлена в следующем виде [3, 4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i u_i}{\partial x} &= 0 \quad (i = 1, 2, 3), \\ \frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1^2}{\partial x} + (1 - \beta - \beta') \frac{\partial p}{\partial x} &= -(\beta'' - \beta') F_{12} - (\beta''' - \beta) F_{13}, \\ \frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2^2}{\partial x} + \beta \frac{\partial p}{\partial x} &= \beta'' F_{12} - \beta F_{13}, \\ \frac{\partial \rho_3 u_3}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 u_3^2}{\partial x} + \beta' \frac{\partial p}{\partial x} &= -\beta' F_{12} + \beta''' F_{13}, \\ \frac{\partial \rho_j e_j}{\partial t} + \frac{\partial \rho_j e_j u_j}{\partial x} &= Q_j \quad (j = 2, 3), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^3 \rho_i E_i}{\partial t} + \frac{\partial \sum_{i=1}^3 \rho_i u_i E_i}{\partial x} + \frac{\partial \sum_{i=1}^3 (\rho_i u_i p / \rho_i^0)}{\partial x} = 0,$$

$$\rho_i = \alpha_i \rho_i^0, \quad E_i = e_i + 0,5u_i^2 \quad (i = 1, 2, 3),$$

$$\beta = 1,5\alpha_2, \quad \beta' = 1,5\alpha_3, \quad \beta'' = 1 - 1,5\alpha_2 - \rho_1^0/2\rho_2^0,$$

$$\beta''' = 1 - 1,5\alpha_3 - \rho_1^0/2\rho_3^0, \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1.$$

Квазилинейная система дифференциальных уравнений в частных производных (1) выражает собой запись законов сохранения массы, импульсов фаз, а также уравнения притоков тепла к фазам и закон сохранения полной энергии смеси. Индексы 1, 2 и 3 относятся соответственно к параметрам газовой фазы и двум фракциям дисперсной фазы. Через ρ_i , ρ_i^0 , α_i , u_i , e_i , E_i соответственно обозначены средняя и истинная плотности, объемное содержание, массовая скорость, удельные внутренняя и полная энергии i -й фазы ($i = 1, 2, 3$); p — давление газа; F_{1j} и Q_{1j} — сила межфазного взаимодействия и интенсивность контактного теплообмена между газом и частицами j -й фракции взвеси ($j = 2, 3$); переменные коэффициенты β , β' , β'' и β''' учитывают вклад сил Архимеда и присоединенной массы в общую силу межфазового взаимодействия.

Система дифференциальных уравнений (1), описывающая в общем случае трехскоростные трехтемпературные неустановившиеся течения двухфракционных газовзвесей, дополняется уравнениями состояния идеального калорически-совершенного газа и несжимаемых твердых частиц

$$p = (\gamma - 1) \rho_1^0 e_1, \quad e_1 = c_1 T_1 \quad (c_1 = \text{const}),$$

$$\rho_j^0 = \text{const}, \quad e_j = c_j T_j \quad (c_j = \text{const}, \quad j = 2, 3),$$

где γ — показатель адиабаты газа; c_1 и $c_2 = c_3$ — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме и удельная теплоемкость частиц взвеси; T_i — температура i -й фазы ($i = 1, 2, 3$).

Полное замыкание системы уравнений (1), (2) осуществляется путем задания законов межфазного трения и теплообмена [3, 4]

$$F_{1j} = \frac{3\rho_1^0 \rho_j^0 C_{dj}}{\alpha_1 \bar{\rho}_j^0 d_j} |u_1 - u_j| (u_1 - u_j),$$

$$Q_{1j} = \frac{6\rho_1^0 \text{Nu}_{1j} \lambda_1 (T_1 - T_j)}{\rho_j^0 \bar{a}_j^2} \quad (j = 2, 3).$$

Здесь C_{dj} — коэффициент аэродинамического сопротивления частиц, имеющих диаметр d_j ; Nu_{1j} — число Нуссельта газовой фазы, характеризующее теплообмен между газом и частицами с размером d_j ; λ_1 — коэффициент теплопроводности газа.

Коэффициенты аэродинамического сопротивления и числа Нуссельта в выражениях (3) задаются в виде следующих зависимостей, учитывающих сжимаемость и стесненность потока [4]:

$$C_{dj} = C_{dj}^0 (\text{Re}_{1j}) [1 + \exp(-0,427/\text{M}_{1j}^{4,63})] \alpha_1^k,$$

$$C_{dj}^0 (\text{Re}_{1j}) = \frac{24}{\text{Re}_{1j}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}_{1j}}} + 0,4, \quad \text{Re}_{1j} = \frac{\rho_1^0 |u_1 - u_j| \bar{a}_j}{\mu_1},$$

$$\text{M}_{1j} = \frac{|u_1 - u_j|}{a_1}, \quad a_1^2 = \gamma \frac{p}{\rho_1^0}, \quad k = \text{const} \sim -2,5,$$

$$\text{Nu}_{1j} = 2 \exp(-\text{M}_{1j}) + 0,459 \text{Re}_{1j}^{0,55} \text{Pr}^{0,33}, \quad \text{Pr} = \gamma c_1 \mu_1 / \lambda_1 \quad (j = 2, 3).$$

В представленных выражениях C_{dj}^0 — коэффициент аэродинамического сопротивления одиночной сферической частицы с размером d_j ; M_{1j} , Pr , Re_{1j} — соответственно число Маха относительного движения фаз, числа

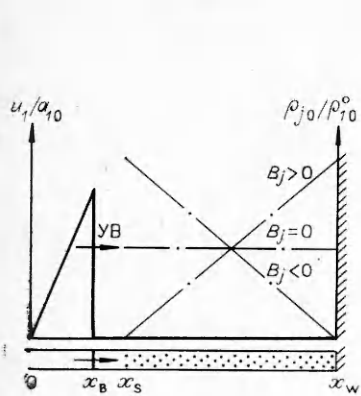


Рис. 1.

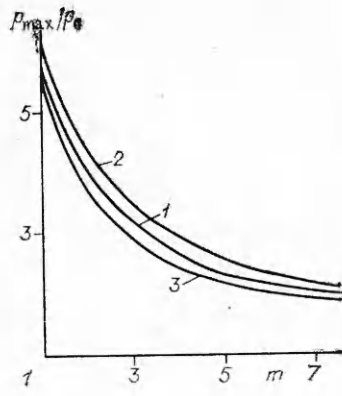


Рис. 2.

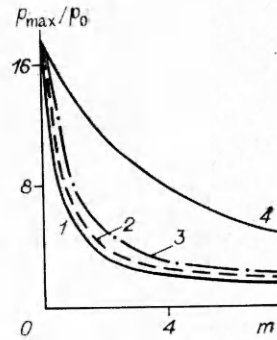


Рис. 3.

Прандтля и Рейнольдса; k — коэффициент, учитывающий стесненность потока; a_1 , μ_1 — адиабатическая скорость звука и динамическая вязкость газа.

Постановка задачи. В начальный момент времени $t=0$ в области $(0 \leq x \leq x_B)$ имеется сильное возмущение газа УВ с треугольным профилем массовой скорости газа (рис. 1). Фронт УВ имеет координату x_B , длина УВ равна x_B . УВ распространяется по невозмущенному покоящемуся газу в области $(x_B < x < x_S)$ и слою неоднородной $(\rho_{j0}(x, 0)/\rho_{10}^0 = A_j + B_j x, A_j, B_j = \text{const}, j = 2, 3)$ или однородной $(\rho_{j0}(x, 0)/\rho_{10}^0 = A_j = \text{const})$ газозвеси в области $x_S \leq x \leq x_W$ (см. рис. 1). Координата $x = x_W$ соответствует жесткой стенке. Требуется изучить влияние экранирующих слоев моно- и полидисперсией однородной или неоднородной газозвеси на снижение максимального давления на стенке преграды за отраженными УВ.

Начальные условия задачи формулируются аналогично работе [4] следующим образом. В области сильного возмущения газа УВ $(0 \leq x \leq x_B)$ на фронте волны $(x = x_B)$ параметры газа задаются на основе соотношений Ренкина — Гюгонио

$$\frac{\rho_1^0(x_B, 0)}{\rho_{10}^0} = \frac{(\gamma + 1) M_0^2}{2 + (\gamma - 1) M_0^2}, \quad \frac{u_1(x_B, 0)}{a_{10}} = \frac{2}{\gamma + 1} \left(M_0 - \frac{1}{M_0} \right),$$

$$\frac{p(x_B, 0)}{p_0} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M_0^2 - 1), \quad \alpha_1(x_B, 0) = 1,$$

в зоне разрежения $(0 \leq x < x_B)$ — параметры газа задаются на основе изоэнтропических зависимостей для простой волны с треугольным профилем скорости газа

$$\frac{\rho_1^0(x, 0)}{\rho_1^0(x_B, 0)} = \left[1 - \frac{(\gamma - 1) u_1(x_B, 0)}{2 a_1(x_B, 0)} \left(1 - \frac{x}{x_B} \right) \right]^{2/(\gamma - 1)},$$

$$\frac{u_1(x, 0)}{u_1(x_B, 0)} = \frac{x}{x_B} \frac{p(x, 0)}{p(x_B, 0)} - \left(\frac{\rho_1^0(x, 0)}{\rho_1^0(x_B, 0)} \right)^\gamma, \quad \alpha_1(x, 0) = 1.$$

В области невозмущенного покоящегося газа перед УВ $(x_B < x < x_S)$ параметры газа соответствуют нормальным атмосферным условиям

$$\frac{\rho_1^0(x, 0)}{\rho_{10}^0} = 1, \quad \frac{u_1(x, 0)}{a_{10}} = 0, \quad \frac{p(x, 0)}{p_0} = 1, \quad \alpha_1(x, 0) = 1.$$

В области экранирующей газозвеси $(x_S \leq x \leq x_W)$ предполагается

$$\frac{\rho_1^0(x, 0)}{\rho_{10}^0} = 1, \quad \frac{u_1(x, 0)}{a_{10}} = 0, \quad \frac{p(x, 0)}{p_0} = 1,$$

$$\frac{\rho_{10}(x, 0)}{\rho_{10}^0} = 1 - \sum_{j=2}^3 (A_j + B_j x) \rho_{10}^0 / \rho_{j0}, \quad \alpha_{10}(x, 0) = \rho_{10}(x, 0) / \rho_{10}^0,$$

$$\frac{\rho_{j0}(x, 0)}{\rho_{10}^0} = A_j + B_j x, \quad \alpha_{j0}(x, 0) = \frac{\rho_{j0}(x, 0)}{\rho_j^0},$$

$$A_j, B_j = \text{const}, \quad j = 2, 3, \quad \rho_2^0 = \rho_3^0.$$

Если взвесь монодисперсная (однофракционная), то $\alpha_{30}(x, 0) = \rho_{30}(x, 0) = 0$. Если взвесь однородная, то $B_j = 0$, если взвесь неоднородная, то $B_j \neq 0$ ($B_j > 0$ или $B_j < 0$). Отметим, что параметр B_j характеризует градиент начальной концентрации частиц в экранирующей газозвеси.

Граничные условия на стенке преграды ($x = x_w$) задавались в виде равенства нулю скорости газа и условия свободного протекания частиц

$$u_1(x_w, t) = 0, \quad u_j(x_{w-}, t) = u_j(x_{w+}, t) \quad (j = 2, 3).$$

На открытой границе ($x = 0$) ставилось условие свободного протекания газа $u_1(0_-, t) = u_1(0_+, t)$. Подробное обсуждение этих граничных условий приводится в [1].

Численно задача решалась методом крупных частиц [5] с использованием алгоритма [6]. Расчеты выполнялись для смесей воздуха и частиц кварцевого песка при следующих значениях термодинамических параметров фаз: $T_0 = 293$ К, $p_0 = 0,1$ МПа, $\rho_{10}^0 = 1,21$ кг/м³, $\gamma = 1,4$, $c_1 = 716$ м²/(с² · град), $a_{10} = 341$ м/с, $\mu_1 = 1,85 \cdot 10^{-5}$ кг/(м · с), $\lambda_1 = 0,026$ (кг · м)/(с³ · град), $\rho_2^0 = 2500$ кг/м³, $c_2 = 710$ м²/(с² · град). Полагалось, что длина набегающей УВ $x_b = 0,45$ м, длина области невозмущенного газа $x_s - x_b = 0,05$ м, протяженность экранирующего слоя газозвеси $x_w - x_s = 3$ м, интенсивность УВ задавалась числом $M_0 = 4,17$, что соответствует давлению на фронте УВ $p = 2$ МПа. Размеры дисперсных частиц и массовое содержание взвеси $m = (\rho_{20} + \rho_{30}) / \rho_{10}$ в смеси варьировались в диапазонах 60—720 мкм, $0 < m \leq 8,3$. Указанные параметры УВ и экранирующего слоя газозвеси позволяют заключить, что исследуются процессы ослабления коротких УВ ($x_w/x_b \geq 1$) узкими слоями газозвеси ($x_w/(x_w - x_s) \geq 1$), где x_w — характерная длина зоны выравнивания скоростей газа и частиц [1].

Результаты расчетов. Некоторые интегральные результаты численного исследования влияния закона распределения начальной концентрации частиц в экранирующих слоях монодисперсной газозвеси на максимальное давление на стенке преграды за отраженными УВ приведены на рис. 2. Кривая 1 иллюстрирует зависимость пикового давления на стенке преграды от относительного массового содержания частиц ($m = \rho_{20} / \rho_{10}$, $d = 60$ мкм) в слоях однородной газозвеси с нулевым градиентом безразмерной средней плотности частиц — $\rho_{20}(x, 0) / \rho_{10}^0 = A_2 + B_2 x$, $B_2 = 0$; 2 и 3 — аналогичные зависимости для слоев газозвеси соответственно с линейно возрастающим и линейно убывающим, вдоль пути распространения УВ, законами изменения безразмерной приведенной плотности частиц $d = 60$ мкм: $\rho_{20}(x, 0) / \rho_{10}^0 = A_2 \pm B_2 x$, $B_2 = 0,8$ м⁻¹. Постоянная A_2 выражается через относительное массовое содержание частиц однородной газозвеси m , исходя из условия постоянства суммарной массы всех частиц в однородном и неоднородном слоях газозвеси:

$$\frac{\rho_{20}(x_w - x_s)}{\rho_{10}^0} = m \frac{\rho_{10}^0}{\rho_{10}^0} = \int_{x_s}^{x_w} (A_2 + B_2 x) dx,$$

$$A_2 = m \frac{\rho_{10}^0}{\rho_{10}^0} - 0,5 B_2 (x_w - x_s).$$

Анализ численных результатов, продемонстрированных на рис. 2, свидетельствует, что наибольший эффект ослабления УВ достигается

экранирующими слоями монодисперсной газозвеси с линейно убывающим законом изменения концентрации частиц (см. рис. 2, 3). Наименьший эффект ослабления УВ достигается слоями монодисперсной газозвеси с линейно возрастающим законом изменения концентрации частиц (см. рис. 2, 2). Промежуточный эффект гашения УВ наблюдается при использовании экранирующих слоев однородной газозвеси (см. рис. 2, 1).

Отмеченное выше поведение численных решений объясняется следующим образом. При распространении УВ по экранирующим облакам газозвеси с линейно убывающим и линейно возрастающим законами изменения концентрации частиц, УВ испытывают соответственно убывающее и нарастающее силовое и тепловое воздействие со стороны взвешенных дисперсных частиц. За характерное время прохождения ударно-волновых возмущений через демпфирующие слои газозвеси ($\tau_r = (x_w - x_s)/(M_0 a_{10})$) наибольшую дисперсию и диссипацию испытывают волны, распространяющиеся по газозвесям с отрицательным градиентом начальной концентрации частиц. В самом деле дисперсия и диссипация волн обусловлены процессами межфазного взаимодействия, интенсивность которых тем выше, чем больше относительная скорость фаз и относительное массовое содержание взвеси¹ (m). При распространении УВ по слою газозвеси с убывающим законом изменения концентрации частиц диссипативные процессы скоростной и температурной релаксации параметров фаз наиболее сильно проявляются в плотных зонах экранирующего облака, где сравнительно большие относительные массовые содержания взвеси и скорости фаз за затухающими УВ. В случае прохождения УВ через слой газозвеси с возрастающим законом изменения концентрации частиц диссипативные процессы межфазного взаимодействия в плотных частях экранирующего облака, расположенных ближе к стенке преграды, проявляются в меньшей степени. Это связано с тем, что УВ, доходящие до плотных слоев экранирующей газозвеси, заметно затухают и за ними относительные скорости газа и частиц оказываются сравнительно небольшими. За отраженными от преграды УВ относительные и абсолютные скорости фаз в плотных слоях экранирующей газозвеси также являются сравнительно малыми. Последнее обстоятельство обусловлено сильным торможением газа за отраженными от преграды УВ и слабой вовлеченностью в движение частиц плотных слоев взвеси, находящихся вблизи стенки преграды в области релаксации параметров фаз ($x_w - x_v \leq x \leq x_w$).

Далее обратимся к результатам численного исследования влияния полидисперсности экранирующей газозвеси на процесс ослабления коротких УВ. Для простоты ограничимся рассмотрением однородных газозвесей, состоящих из двух фракций частиц с сильно отличающимися размерами ($d_2 \ll d_3$) и соответственно временами релаксации скоростей фаз $\tau_v^{(2)} \ll \tau_v^{(3)}$. Именно для таких двухфракционных газозвесей качественная картина дисперсии и затухания звуковых волн может существенно отличаться от картины дисперсии и затухания звука в монодисперсных газозвесах [7].

На рис. 3 приведены характерные расчетные зависимости максимального давления на стенке преграды за отраженными УВ в однородных экранирующих слоях моно- и полидисперсной газозвесей от относительного массового содержания дисперсных частиц. Кривые 1 и 4 соответствуют монодисперсным газозвесям с размером частиц, равным 60 и 720 мкм. Кривая 3 соответствует двухфракционным (полидисперсным) слоям газозвеси с $d_2 = 60$ мкм и $d_3 = 720$ мкм и с относительными массовыми содержаниями фракций частиц $m_2 = m_3$ ($m_2 = \rho_{20}/\rho_{10}$, $m_3 =$

¹ Для примера можно указать, что характерное время релаксации скоростей фаз в смеси τ_v выражается через массовое содержание взвеси следующей зависимостью: $\tau_v = \tau_v^S / (1 + m)$, где τ_v^S — статическое время выравнивания скорости одиночной частицы в потоке газа.

$= \rho_{30}/\rho_{10}$, $m = m_2 + m_3 = 2m_2$); 2 — монодисперсная смесь с эффективным диаметром частиц $d_* = 86$ мкм, рассчитанным в соответствии с акустической теорией звука в полидисперсных газовзвесах для случая коротких волн ($x_0/x_n \gg 1$) [7]:

$$d_* = \left(\sqrt{\frac{m_2 d_2^{-2} + m_3 d_3^{-2}}{m_2 + m_3}} \right)^{-1}.$$

Из рис. 3 видно, что в моно- и полидисперсных газовзвесах максимальное давление на стенке преграды за отраженными УВ монотонно уменьшается с ростом относительного массового содержания частиц в экранирующих взвесах. Наименьшее ослабление УВ достигается слоями однородной монодисперсной газовзвеси с крупными дисперсными частицами (см. рис. 3, 4). Наибольшее ослабление УВ наблюдается в случае однородных монодисперсных слоев газовзвеси с мелкими частицами (см. рис. 3, 1). Промежуточный эффект ослабления УВ реализуется в случае однородных полидисперсных экранирующих слоев газовзвеси (см. рис. 3, 3). Данные сравнения кривых 1, 3, 4 вполне очевидны.

Наибольший интерес представляет сопоставление на рис. 3 кривых 3 и 2, соответствующих решениям для полидисперсных газовзвесей и монодисперсных смесей с эффективным размером частиц d_* . Результаты решений позволяют заключить, что при прочих одинаковых условиях монодисперсные газовзвеси лучше полидисперсных ослабляют УВ. Данный вывод согласуется с выводами акустического анализа [7].

Таким образом, в результате выполненного численного исследования установлено, что при фиксированной общей массе взвеси лучше экранируют воздействие коротких УВ на преграду слои неоднородной монодисперсной газовзвеси с отрицательным градиентом начальной концентрации частиц по сравнению со случаем экранирования слоями газовзвеси с положительным или нулевым градиентом концентрации частиц. При фиксированной общей массе всех дисперсных частиц лучше ослабляют пиковое давление на стенке преграды за короткими УВ экранирующие слои однородной монодисперсной газовзвеси по сравнению со случаем ослабления УВ слоями однородной полидисперсной газовзвеси.

Авторы выражают искреннюю благодарность Н. А. Гумерову за обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивандаев А. И., Кутушев А. Г. Влияние экранирующих слоев газовзвеси на отражение ударных волн // ПМТФ.— 1985.— № 1.— С. 115.
2. Кругликов Б. С., Кутушев А. Г. Ослабление ударных волн экранирующими решетками // ФГВ.— 1988.— 24, № 1.— С. 115.
3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред.— М.: Наука, 1987.— Ч. 1.
4. Ивандаев А. И., Кутушев А. Г., Нигматулин Р. И. Итоги науки и техники. Сер. Мех. жидкости и газа/ВИНИТИ.— 1981.— Т. 16.
5. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике.— М.: Наука, 1982.
6. Ивандаев А. И., Кутушев А. Г. // Численные методы механики сплошной среды.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР.— 1983.— 14, № 6.— С. 58.
7. Гумеров Н. А., Ивандаев А. И. Распространение звука в полидисперсных газовзвесах // ПМТФ.— 1988.— № 5.— С. 115.