

характеризуются большим разбросом форматов и структур данных, в целом не являются некоей унифицированной информационной основой.

На уровне *обработки и хранения* эти разнообразные наборы цифровых данных преобразуются в унифицированные наборы и структуры в соответствии с требованиями хранения в базе данных и становятся элементами единой информационной модели (информационной основы).

Однако и здесь мы имеем не саму цифровую модель, а лишь исходные (избыточные) данные для ее создания. Упрощенно говоря, на этом уровне вся исходная информация унифицируется, реструктурируется и размещается в таблицы базы данных.

На уровне *представления* происходит окончательное создание цифровой модели местности в соответствии с требованиями на проектирование (или построение) ЦММ на основе информации, хранимой в базе данных (см. рис. 1). На этом уровне определяют внешние и внутренние ключи таблиц, устанавливают связи между таблицами, определяют метаданные.

В общем виде ЦММ может быть определена как совокупность множеств метрической, семантической, параметрической информации и класса операций преобразования над этими множествами [2,3]

**Выводы.** Моделирование в среде ГИС — быстроразвивающееся направление, необходимость которого диктуется рядом гидрогеологических, метеорологических, экологических задач и задачами обустройства месторождений нефтегазового комплекса, требующих количественного описания трехмерной среды, параметры которой меняются во времени. Современные ГИС предоставляют широкие возможности для обработки данных в векторном и растровом представлениях, выполнения операций геометрического анализа, решения задач анализа и оптимизации сетей, моделирования геополей различной природы и построения цифровых моделей.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Цветков В. Я. Основы геоинформатики (электронный учебник). М., 1998. 617 с. Государственный регистр баз данных. Регистр № 022984851.
2. Захаров А. А., Широких А. В. Информационные системы для задач численного моделирования. Тюмень, 2002. 183 с.
3. Цветков В. Я. Геоинформационное моделирование // Информационные технологии. 1998. № 3. С. 45.
4. Мусин О. Р. Цифровые модели для ГИС // Информационный бюллетень ГИС. 1998. № 4(16). С. 28.

*Анвар Гумерович КУТУШЕВ —  
профессор кафедры механики  
многофазных систем физического  
факультета, доктор физико-  
математических наук*

УДК 532.529

## **ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО МЕЖГРАНУЛЯРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЧАСТИЦ И ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗА НА РАЗЛЕТ СЖАТОГО СЛОЯ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ**

**АННОТАЦИЯ.** В рамках двухскоростной двухтемпературной двухдавленной контактной смеси газа и твердых частиц численно исследуется процесс разлета уплотненных и насыпных порошкообразных сред из камеры высокого давления в газовое пространство камеры низкого давления ударной трубы. Анализируется влияние уплотненности порошка на параметры воздушных ударных волн.

*Within the framework of the two-velocity two-temperature with two pressures contact mixture of gas and solid particles the scattering process of bulk medium from driver section into the gas space of driven section of shock tube is studied numerically. The influence of powder compression on the parameters of air shock waves is analyzed.*

Осуществление многих технологических процессов, связанных с производством, переработкой и транспортом дисперсных материалов, часто сопряжено с использованием систем высокого давления, внутри которых находятся двухфазные рабочие смеси типа «газ + твердые частицы». Безопасное функционирование таких систем требует всестороннего детального анализа возможных аварийных ситуаций, вызванных сбоем технологических режимов. В частности, важным аспектом такого анализа является прогнозирование параметров ударных волн (УВ), возникающих в окружающей среде при разрушении стенок установок, содержащих внутри себя сжатые газонасыщенные сыпучие материалы.

Динамика истечения контактных дисперсных смесей газа с твердыми частицами в атмосферный газ рассматривалась в работах [1-2]. Следует отметить, что в указанных работах исследовался разлет порошкообразных сред, изначально находящихся в насыпном состоянии. Практически важный случай истечения сжатых порошкообразных сред, в которых перед разлетом в газовое пространство частицы дисперсной фазы находились в напряженном состоянии, ранее не изучался. В этой связи в данной работе рассматривается влияние уплотненности скелета пористой порошкообразной среды на параметры воздушной УВ, распространяющейся в камере низкого давления (КНД) ударной трубы.

**Основные уравнения.** Для описания одномерного плоского нестационарного движения пористой порошкообразной среды используются уравнения движения двух-скоростной, двухтемпературной, двухдавленной смеси газа и контактирующих между собой твердых несжимаемых деформируемых частиц [2-4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{11}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{11} v_1}{\partial x} &= 0, & \frac{\partial \rho_{12}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{12} v_1}{\partial x} &= 0, & \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 v_2}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial \rho_1 v_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 v_1^2}{\partial x} + \alpha_1 \frac{\partial p}{\partial x} &= -\alpha_1 F_{12}, \\ \frac{\partial \rho_2 v_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 v_2^2}{\partial x} + \alpha_2 \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_{2x}^x}{\partial x} &= \alpha_1 F_{12}, \\ \frac{\partial \rho_2 e_{2T}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 e_{2T} v_2}{\partial x} - \xi_{2T} \sigma_{2x}^x \frac{\partial v_2}{\partial x} &= Q_{12}, \\ \frac{\partial \rho_2 e_{2p}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 e_{2p} v_2}{\partial x} - (1 - \xi_{2T}) \sigma_{2x}^x \frac{\partial v_2}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 E_1 + \rho_2 E_2) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_1 E_1 v_1 + \rho_2 E_2 v_2) + \frac{\partial}{\partial x} [p(\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2) - \sigma_{2x}^x v_2] &= 0, \\ \rho_i &= \rho_i^0 \alpha_i, & E_i &= e_i + 0,5 v_i^2, & \alpha_1 + \alpha_2 &= 1, & e_2 &= e_{2T} + e_{2p}, \\ \rho_{1k} &= \rho_{1k}^0 \alpha_1 (k=1,2), & \rho_1 &= (1-\varepsilon) \rho_{11} + \varepsilon \rho_{12}, & \rho_1^0 &= (1-\varepsilon) \rho_{11}^0 + \varepsilon \rho_{12}^0, \\ \alpha_1 &= (1-\varepsilon) \alpha_{11} + \varepsilon \alpha_{12}, & e_1 &= (1-\varepsilon) e_{11} + \varepsilon e_{12}, & p &= (1-\varepsilon) p_{11} + \varepsilon p_{12}. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь и далее индексы 11 и 12 внизу относятся к параметрам двух несмешивающихся химически-инертных газов; индексы 1 и 2 внизу относятся к параметрам газовой и дисперсной фаз соответственно;  $\varepsilon$  — параметр, принимающий значение 0 в области пространства, занятой первым газом, и 1 — в области пространства, занятой вторым газом.

Через  $\rho, \rho_0, \alpha, v, e, E$  — обозначены приведенная и истинная плотности, объемное содержание, массовая скорость, удельные внутренняя и полная энергии;  $p$  — давление газовой фазы;  $\sigma_{2*}^{xx} = -p_f$  — фиктивное межгранулярное «давление» частиц порошка, связанное только с деформацией скелета пористой среды и равное разности полного напряжения в смеси ( $\sigma^{xx}$ ) и напряжения в поровом газе ( $\sigma_{2*}^{xx} = \sigma^{xx} - \sigma_1 = -p_2 + p$ );  $F_{12}$  и  $Q_{12}$  — интенсивности силового и теплового взаимодействия фаз;  $e_{2T}$  и  $e_{2p}$  — тепловая и упругая составляющие внутренней энергии частиц;  $\xi_{2T}$  — коэффициент, определяющий долю работы сил межгранулярного взаимодействия ( $-\sigma_{2*}^{xx} \partial v_2 / \partial x$ ), идущей на разогрев скелета пористой среды ( $0 \leq \xi_{2T} \leq 1$ ).

Система дифференциальных уравнений (1) дополняется уравнениями состояния идеальных калорически совершенных газов ( $k=1,2$ ), несжимаемых твердых частиц и пористого скелета порошка [2,3,5]

$$p_{1k} = (\gamma_{1k} - 1) \rho_{1k}^0 e_{1k}, \quad e_{1k} = c_{1k} T_1, \quad \rho_2^0 = const, \quad e_2 = c_2 T_2,$$

$$-\sigma_{2*}^{xx} = p_f = \begin{cases} \rho_2^0 \alpha_{1b} a_{2b}^2 \left[ \frac{\alpha_{1b}}{\alpha_1} - 1 \right], & \alpha_1 \leq \alpha_{1b}, \\ 0 & \alpha_1 > \alpha_{1b} \end{cases}, \quad (2)$$

$$a_{2b} = a_{2p} + k_p (\alpha_{1p} - \alpha_{1b}) \quad \alpha_{1b} \leq \alpha_{1p}.$$

Здесь  $\gamma_{1k}, c_{1k}$  — показатель адиабаты и удельная теплоемкость при постоянном объеме  $k$ -го газа;  $c_2$  — удельная теплоемкость частиц;  $T_i$  — температура  $i$ -й фазы;  $\alpha_{1b}$  и  $a_{2b}$  — пористость и скорость звука в порошке в начальном состоянии, а  $\alpha_{1p}$  и  $a_{2p}$  — в насыпном состоянии;  $k_p$  — коэффициент, характеризующий рост скорости звука при уплотнении порошка. Принятое в (2) уравнение состояния Гофа – Шварца для пористого материала соответствует схеме нелинейно-упругого поведения порошка при сжатии и нагрузке ( $\xi_{2T} \rightarrow 0$ ).

Интенсивности межфазного трения и контактного теплообмена задаются на основе выражений [2-4]

$$F_{12} = \frac{0,75 \alpha_2 C_d \rho_1^0 |v_1 - v_2| (v_1 - v_2)}{d}, \quad Q_{12} = \frac{6 \alpha_2 \lambda_1 Nu_{12} (T_1 - T_2)}{d^2},$$

$$C_d = \begin{cases} C_d^{(1)} = \frac{24}{Re_{12}} + \frac{4,4}{\sqrt{Re_{12}}} + 0,42, & 0 < \alpha_2 < 0,08 \\ \frac{(\alpha_2 - 0,08) C_d^{(2)} + (0,45 - \alpha_2) C_d^{(1)}}{0,37}, & 0,08 \leq \alpha_2 \leq 0,45, \\ C_d^{(2)} = \frac{4}{3 \alpha_1} \left( 1,75 + \frac{150 \alpha_2}{\alpha_1 Re_{12}} \right), & 0,45 < \alpha_2 \leq 1 \end{cases}, \quad (3)$$

$$Nu_{12} = \begin{cases} 2 + 0,106 Re_{12} Pr_1^{0,33}, & 0 \leq Re_{12} \leq 200 \\ 2,274 + 0,6 Re_{12}^{0,67} Pr_1^{0,33}, & Re_{12} > 200 \end{cases}$$

$$Re_{12} = \frac{\rho_1^0 |v_1 - v_2| d}{\mu_1}, \quad Pr_1 = \frac{\gamma_1 c_1 \mu_1}{\lambda_1}, \quad \gamma_1 = (1 - \epsilon) \gamma_{11} + \epsilon \gamma_{12},$$

$$\mu_1 = (1 - \epsilon) \mu_{11} + \epsilon \mu_{12}, \quad \lambda_1 = (1 - \epsilon) \lambda_{11} + \epsilon \lambda_{12}.$$

Здесь  $Re_{12}$  и  $Nu_{12}$  — числа Рейнольдса и Нуссельта относительного движения фаз;  $Pr_1$  — число Прандтля газа;  $C_d$  — коэффициент межфазного трения;  $d$  — диаметр частиц;  $\lambda_{1k}, \mu_{1k}$  — коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости.

**Постановка задачи.** В рамках представленных уравнений рассматривается следующая задача. В начальный момент времени  $t=0$  в камере высокого давления (КВД) ударной трубы ( $0 \leq x \leq L_1$ ) находится покоящаяся термодинамически равновесная смесь сжатого газа (азота) с твердыми частицами, образующими уплотненную порошкообразную среду; в КНД трубы ( $L_1 \leq x \leq L_2$ ), отделенной от КВД диафрагмой ( $x=L_1$ ) находится невозмущенный атмосферный газ (воздух). Ставится цель: изучить влияние начального межгранулярного напряжения частиц порошка в КВД на параметры воздушных УВ в КНД. Схематическое представление задачи приводится на рис. 1. В качестве граничных условий задачи использовались условия равенства нулю скоростей газа и частиц на торцах трубы.

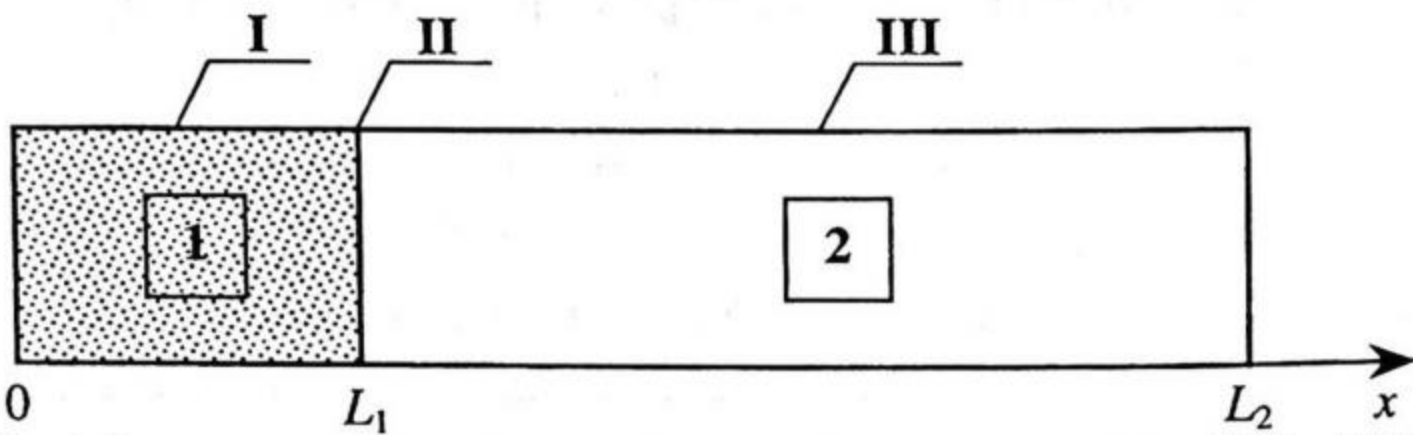


Рис. 1. Схематическое представление задачи о разлете слоя порошка из КВД в КНД ударной трубы. КВД заполнена порошком (1) в порах которого находится газообразный азот, а КНД заполнена атмосферным воздухом (2). I, II, III — соответственно КВД, диафрагма, КНД

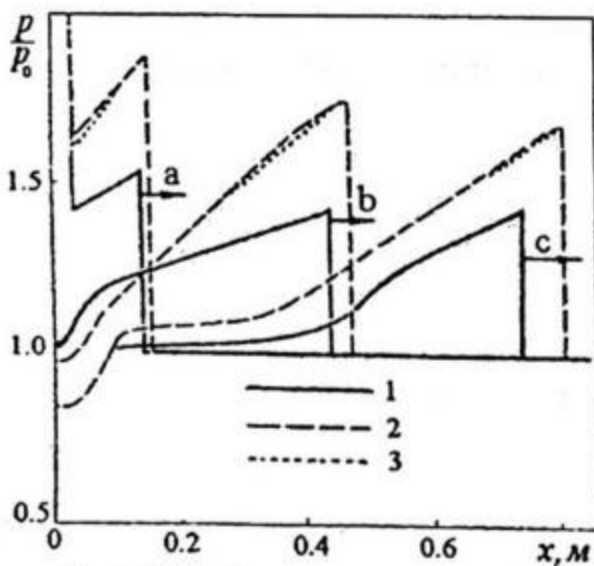


Рис. 2. Профили давления газа при разлете из КВД ударной трубы слоев порошкообразной среды в газовое пространство КНД в моменты времени 0,3 (а), 1,0 (в), 1,75мс (с). Кривые 1 и 3 соответствуют уплотненным слоям порошкообразных сред, а кривая 2 — насыпному слою. Начальные давления порошкового газа, межгранулярного напряжения в фазе частиц и полное давление смеси в КВД: 1-  $p_0=2,0$  МПа,  $p_{p0}=1,5$  МПа,  $p_{\Sigma 0}=3,5$  МПа; 2-  $p_0=3,5$  МПа,  $p_{p0}=0$ ,  $p_{\Sigma 0}=3,5$  МПа; 3-  $p_0=3,5$  МПа,  $p_{p0}=1,5$  МПа,  $p_{\Sigma 0}=5,0$  МПа

Численное интегрирование системы уравнений (1)–(3) осуществлялось методом крупных частиц [6, 7]. Расчеты выполнялись для смесей азота, частиц кварцевого песка и воздуха. При этом принимались следующие значения термодинамических параметров фаз: азот в КВД —  $T_{10}=293$  К,  $\gamma_{11}=1,4$ ,  $c_{11}=742$  м<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup>·К),  $\mu_{11}=1,75 \cdot 10^{-5}$  кг/(м·с),  $\lambda_{11}=2,56 \cdot 10^{-2}$  кг·м/(с<sup>3</sup>·К); воздух в КНД —  $p_0=0,1$  МПа,  $\rho_{120}^0=1,19$  кг/м<sup>3</sup>,  $T_0=293$  К,  $\gamma_{12}=1,388$ ,  $c_{12}=717$  м<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup>·К),  $\mu_{12}=1,81 \cdot 10^{-5}$  кг/(м·с),  $\lambda_{12}=2,58 \cdot 10^{-2}$  кг·м/(с<sup>3</sup>·К); частицы кварцевого песка в КВД —  $\rho_2^0=2540$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_2=710$  м<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup>·К),  $\alpha_{1p}=0,27$ ,  $a_{2p}=420$  м/с,  $k_p=5450$  м/с;  $d=200$  мкм. Длина КВД ( $L_1$ ) и общая длина трубы ( $L_2$ ) полагались равными 0,015 и 3 м. Величины начального давления смеси ( $p_{\Sigma 0}$ ), межгранулярного давления ( $p_{p0}$ ), порошкового давления газа ( $p_0$ ), а также исходной пористости дисперсной среды ( $\alpha_{1b}$ ) варьировались.

**Некоторые результаты.** Для иллюстрации влияния начальных давлений порошкового газа ( $p_0$ ) и частиц ( $p_{p0}$ ) в КВД ударной

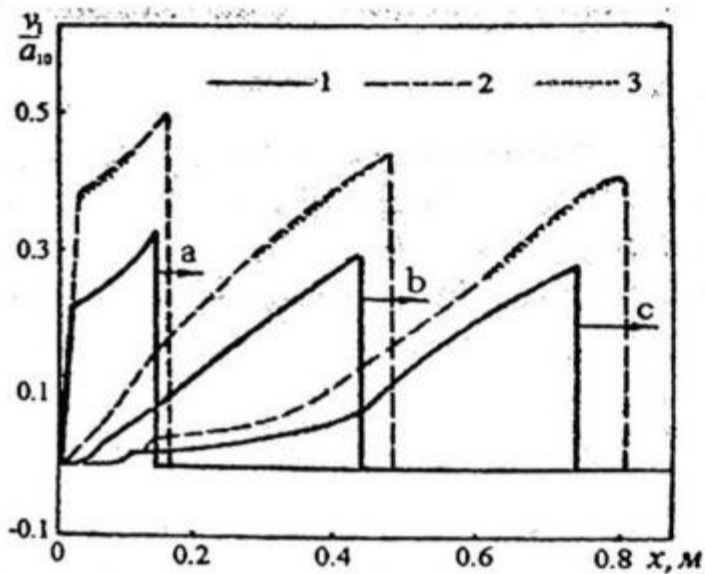


Рис.3. Соответствующие рис.2 профили скорости газовой фазы. Масштаб обезразмеривания скорости ( $a_{10}$ ) — адиабатическая скорость звука в невозмущенном воздухе в КНД ( $a_{10}=341$  м/с)

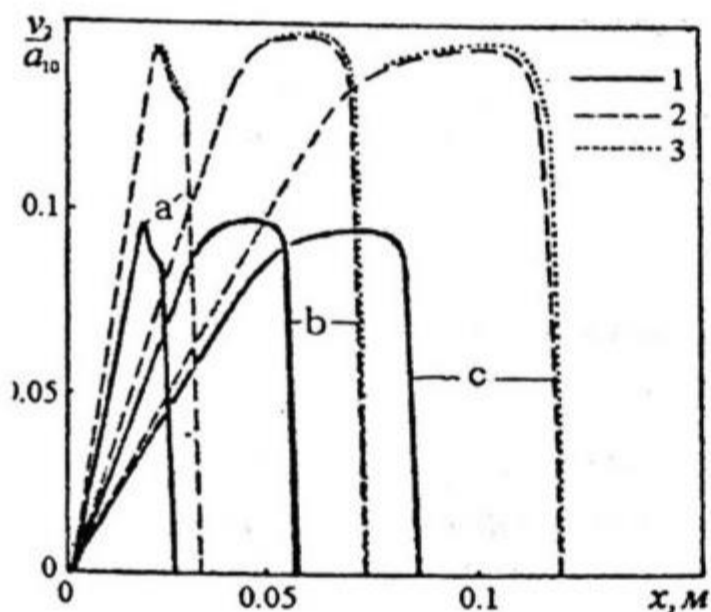


Рис.4. Профили скорости частиц дисперсной фазы. Обозначения и моменты времени такие же, как на рис.2

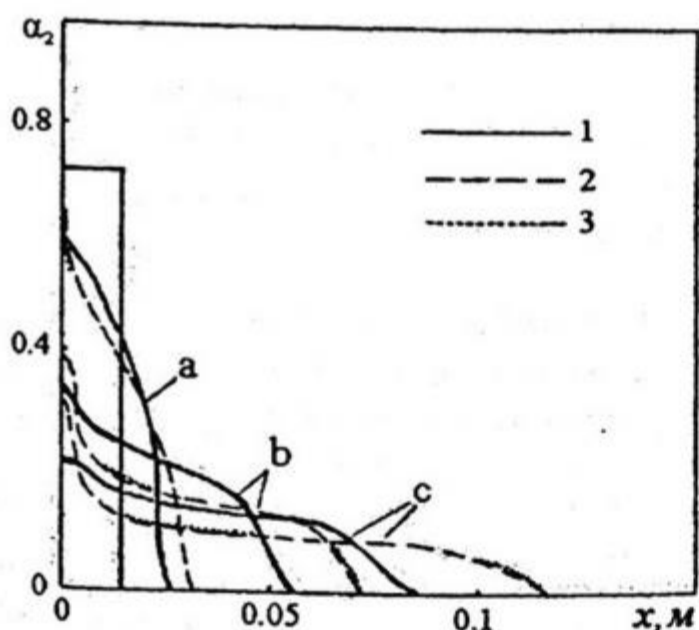


Рис.5. Соответствующие рис.2–4 профили объемного содержания дисперсной фазы

трубы были проведены три характерные серии расчетов. В первой серии расчетов полагалось, что давление в уплотненной смеси (порошкообразной среде) —  $p_{\Sigma 0}=3,5$  МПа, межгранулярное напряжение в фазе частиц —  $p_p=1,5$  МПа и поровое давление газа —  $p_* = 2,0$  МПа ( $p_{\Sigma 0}=p_p+p_*$ ). Во второй (контрольной) серии вычислений считалось, что порошкообразная среда является неуплотненной (насыпной) и в ней также  $p_{\Sigma 0}=3,5$  МПа, но  $p_p=0$  и  $p_*=3,5$  МПа. В третьей серии расчетов принималось, что  $p_{\Sigma 0}=5,0$  МПа,  $p_p=1,5$  МПа и  $p_*=3,5$  МПа. Результаты численного эксперимента для указанных выше значений исходных давлений смеси и ее фаз представлены на рис.2–5, где показаны профили давлений газа, скоростей фаз и объемного содержания взвеси на ряд моментов времени после распада начального разрыва в системе «сжатый азот + порошок – воздух».

Из рисунков видно, что амплитуда и скорость воздушной УВ в контрольном варианте (соответствующем случаю насыпной среды в КВД с  $p_p=0$ ) заметно больше, чем аналогичные параметры, полученные в первой серии расчетов для случая уплотненной среды с  $p_p=1,5$  МПа. Принимая во внимание, что суммарное давление в КВД в начальный момент времени в обоих рассматриваемых вариантах вычислений было одинаковым, можно заметить, что, по сравнению с начальным поровым газовым давлением ( $p_*$ ), исходное межчастичное давление дисперсной фазы ( $p_p$ ) оказывает меньшее влияние на формирование и дальнейшее распространение воздушной УВ.

Сравнение данных контрольной и третьей серий расчетов, соответствующих одному и тому же значению давления порового газа в КВД, но разным величинам  $p_p$  и соответственно различным значениям  $p_{\Sigma 0}$ , свидетельствует, что уплотнение порошка приводит к весьма незначительному увеличению амплитуды и скорости УВ. Столь малое влияние  $p_p$  на параметры воздушных УВ объясняется тем, что упругая энергия ( $e_{2p}$ ), запасенная в уплотненной дисперсной фазе в начальный момент времени, слишком мала для придания частицам порошкообразной среды сколь-либо

существенной скорости. Последнее связано с тем, что рассматриваются малые деформации скелета порошка ( $\alpha_{1p} - \alpha_{1b} \ll 1$ ).

Данные выполненного численного исследования свидетельствуют, что при начальном межгранулярном давлении частиц ( $p_p$ ), сравнимом по величине с давлением порового газа ( $p$ ), его влияние на параметры воздушных УВ незначительное и при практических расчетах им можно пренебречь.

Автор выражает признательность В. В. Мальцеву за помощь в проведении численных расчетов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев С. П., Поленов А. Н., Гельфанд Б. Е. и др. Воздушные УВ при внезапном расширении сжатой двухфазной среды насыпной плотности // Физика горения и взрыва. 1987. Т.23. № 3. С. 135-139.
2. Кутушев А. Г., Рудаков Д. А. Численное исследование параметров воздушных УВ при разлете расширяющегося слоя порошкообразной среды // Физика горения и взрыва. 1992. Т.28. № 6. С. 105-112.
3. Ахатов И. Ш., Вайнштейн П. Б. Переход горения пористых ВВ в детонацию // Физика горения и взрыва. 1984. Т.20. № 5. С. 8-14.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч.1. М., 1987.
5. Gough P. S., Zwartst F. J. Modeling heterogeneous two-phase reacting flow // AIAA J. 1979. V.17. №1. P. 17-25.
6. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М., 1982.
7. Кутушев А. Г., Рудаков Д. А. Математическое моделирование динамического нагружения слоя пористой порошкообразной среды сжатым газом // Математическое моделирование. 1991. Т.3. № 11. С. 65-75.

*Людила Петровна СЕМИХИНА —  
доцент кафедры механики многофазных  
систем физического факультета,  
кандидат физико-математических наук*

УДК 546.212

### **РАЗРАБОТКА ИНДУКТИВНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТЕЙ**

*АННОТАЦИЯ. Разработан индуктивный метод измерения диэлектрических параметров объектов, с помощью которого в диапазоне частот 10кГц-10МГц в воде и ее растворах фиксируется низкочастотная дисперсия диэлектрической проницаемости и низкочастотный максимум диэлектрических потерь.*

*The inductive method for dielectric property of liquid investigation was developed with the help of which in water and its solutions the low-frequency permittivity dispersion and the low-frequency maximum for angle tangent of dielectric losses ( $tg\delta$ ) at a frequency range 10kHz – 40MHz is observed.*

В последние годы резко возрос интерес к физике кластеров, в том числе и к кластерам воды, из-за их важной роли в различных природных явлениях [1-4]. В [5] предсказано существование в воде кластеров из  $10^6$  молекул, которые в диапазоне частот  $10^4$ - $10^6$  Гц должны увеличивать диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  воды в 10 раз по сравнению с известным значением. Однако существование даже малых кластеров в