МНОГОФАЗНЫЕ
СИСТЕМЫ 2012

УДК 532.0758;539.374

Молярный перенос в двухфазной среде

Хусанов И.Н.*, **Ходжаев Я.Д.****, **Мирзоев А.А.****

*Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз, Ташкент, Узбекистан,
**Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Ташкент, Узбекистан

В данной работе предлагаются реологические модели состояния двухфазных сред и уравнения напряженно-деформационных состояний, учитывающие объемные содержания реологических свойств фаз. Решением ретардационной модели жидкости в виде двухфазной среды установлены неизвестные до настоящего времени объективно существующие процессы вязкого преддействия и последействия.

1. Введение

Из анализа большого количества работ по деформации и течению дисперсных систем следует, что в этих системах одновременно проявляются упругие и вязкие свойства [1, 2, 12–15]. Например, под действием нагрузки пространственная сетка в дисперсионной системе разрушается и частицы дисперсной фазы приобретают текучие свойства, т.е. теряют в определенном количестве упругие свойства, а при снятии нагрузки в результате взаимодействий между собой частицы дисперсной фазы образуют структуру, приводящую к резкому повышению вязкости и приобретению системой свойств твердых деформируемых тел (пластические смазки, глинистые растворы и т.д.). Также из наблюдения течений даже вязкой жидкости следует, что при снятии нагрузки жидкость не прекращает свое движение и деформирование мгновенно, что свидетельствует о проявление не только ньютоновской силы инерции, но и деформационной инерции. Это новое деформационное свойство было установлено и описано в [4–6].

В исследованиях течений сред, содержащих несколько фаз, находящихся в различных агрегатных состояниях и движущихся при небольших скоростях (относительно турбулентных потоков), в последние годы исследователями развиваются представления о том, что в этих средах перенос физической субстанции осуществляется не только на молекулярном, но и молярном уровнях [3–7].

В данной работе, основываясь на результатах [3–7], где разработаны способы получения механических и реологических моделей упруго-вязко-инертных сред, предлагаются реологические модели состояния двухфазных сред и их уравнения напряженно-деформационных состояний. Решением уравнения ретардирующей жидкости в виде двухфазной реологической модели среды установлены неизвестные до настоящего времени объективно существующие процессы вязкого преддействия и последействия.

2. Постановка и решения проблемы

Представим себе среду, состоящую из частиц ньютоновской жидкости, обладающей вязкими свойствами; твердых частиц, обладающих упругими свойствами, а также связанных в комплексы большого количества того и другого сортов частиц. Эти, связанные в комплексы частицы, назовем «молярной» фазой, состоящие из крупных относительно частиц первой и второй фаз и проявляющие свойства деформационной инертности [7].

Как известно, жидкие свойства определяются динамической вязкостью жидкости — μ, свойства твердых частиц, как твердого тела определяются коэффициентом упругости — G, а установленное новое свойство «молярной» фазы — крупных относительно частиц первой и второй фаз и проявляющих свойства деформационной инертности определяется коэффициентом линейной плотности молей — m_ℓ.

Предполагая, что в выделенном объеме находятся два сорта частиц и они распределены случайным образом, и каждый сорт частиц занимает определенную долю объема, то эта часть объема будет обладать свойствами тех частиц, которые в нем находятся. Если в данном объеме находятся частицы ньютоновской жидкости, то эта часть объема будет обладать свойством, выражающимся истинной динамической вязкостью μ_i, а вторая часть выделенного объема, содержащая более крупные частицы, будет обладать свойством деформационной инерт-

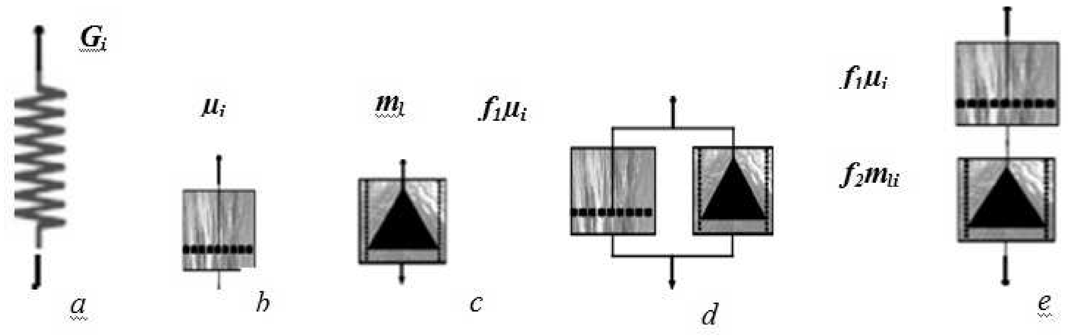

Рис. 1. Механические элементы a, b, c. Параллельное и последовательное соединение элементов Ньютона и деформационной инертности d, e

ности, это свойство определяется истинным коэффициентом линейной плотности $m_{\ell i}$. Если теперь предположить, что из выделенного объема изъяты молярные частицы, а жидкость распределена по всему объему, то она будет иметь свойство жидкости, выражаемое приведенной динамической вязкостью μ_n. Таким же образом, если из выделенного объема, в котором находятся частицы вязкой жидкости и молярные частицы, изъять вязкую жидкость и считать, что молярные частицы, имевшие истинные коэффициенты линейной плотности $m_{\ell i}$, распределены по всему выделенному объему, то эта среда будет иметь теперь коэффициент приведенной линейной плотности $m_{\ell n}$, а отношения приведенных параметров, выражающих собой реологические свойства к истинным реологическим свойствам, т.е. $\mu_n/\mu_i = f_1$ и $m_{\ell n}/m_{\ell i} = f_2$ есть нечто иное (по аналогии представлениям Х.А. Рахматуллина и др. [7,8]) как объемная доля вязких и деформационно инертных свойств смеси соответственно. Это же рассуждение, распространив для упругого свойства твердых частиц в случае нахождения их в выделенном объеме, получим объемную долю упругих свойств в смеси в виде $G_n/G_i = f_3$.

Если в выделенном объеме отсутствуют частицы, имеющие деформационные свойства, кроме рассмотренных выше, то будем иметь соотношение:

$$\mu_n/\mu_i + m_{\ell n}/m_{\ell i} + G_n/G_i = 1 \text{ или } f_1 + f_2 + f_3 = 1.$$

Так как $\mu_n = f_1\mu_i$, $m_{\ell n} = f_2 m_{\ell i}$ и $G_n = f_3 G_i$, то в смеси напряжения по законам Гука, Ньютона и деформационной инертности выразятся следующим образом [11]:

$$\tau_{ij} = f_1\mu_i\dot{\gamma}_{ij}, \quad \tau_{ij} = f_2 m_{\ell i}\ddot{\gamma}_{ij}, \quad \tau_{ij} = f_3 G_i\gamma_{ij}. \quad (1)$$

где τ_{ij} — напряжения; γ_{ij}, $\dot{\gamma}_{ij}$ и $\ddot{\gamma}_{ij}$ — деформации, скорости деформаций и ускоренные деформации соответственно; $m_{\ell i}$ — коэффициент пропорциональности, имеющий размерность линейной плотности (кг/м) и прямо пропорциональный объемной плотности, помноженной на квадрат динамического расстояния.

Как известно, механическим элементом соответствующим реологическому закону упруго деформируемых тел является пружина, а вязкой жидкости — перфорированный поршень, находящийся в цилиндрическом сосуде (рис. 1(a, b)) соответственно.

Для сред, обладающих свойствами деформационной инертности и соответствующих реологическому закону Хусанова И.Н. (второе уравнение в (1)), предложен механический элемент рис. 1(c), описанный ниже [5].

Механический элемент, инертно сопротивляемый к деформационным процессам сред, состоит из массивного конуса вращения, находящегося в цилиндре с перфорированными стенками, который, в свою очередь, находится в цилиндрическом непроницаемом сосуде. При погружении или всплывании массивного конуса вращения происходит вытеснение жидкости из пор внутреннего цилиндра в между цилиндрическое пространство. В этом узком пространстве жидкость движется в сторону, противоположную движению конуса, компенсируя продвинутый объем конуса. В щели жидкость ускоренно деформируется (течет) (рис. 1(c)). Чем больше линейная плотность жидкости, тем больше сопротивления.

Далее рассмотрим случаи, когда упругими свойствами частиц можно пренебречь.

Соединяя параллельно и последовательно элементы Ньютона и деформационной инертности (рис. 1(b, c)) [5], получим ретардационные и релаксационные механические модели, приведенные на рис. 1(d, e), и соответствующие им уравнения напряженно-деформационных состояний, которые при пренебрежении индексами тензорных величин будут иметь вид:

$$\tau = f_1\mu_i\left(\dot{\gamma} + t_{ret(Kh_1)}\ddot{\gamma}\right), \qquad (2)$$

где $t_{rel(Kh_1)} = f_2 m_{li}/f_1\mu_i$ — время ретардации;

$$\tau + t_{rel(Kh_1)}\dot{\tau} = f_2 m_l\ddot{\gamma}, \qquad (3)$$

где $t_{rel(Kh_1)} = f_2 m_{li}/f_1\mu_i$ — время релаксации.

Реологические уравнения (2) и (3) выражают собой напряженно-деформационные состояния вязко-инертной текучей среды, под которой подразумевается жидкость, часть которой состоит из ньютоновской непрерывной вязкой деформируемой фазы, а часть — из жидких частиц, объединенных между собой, с образованием моли — второй фазы. Эти смеси кроме вязкого деформационного механизма деформируются по инерции [6, 7].

Особенности структурной организации сред, т.е. существование различных форм их молекулярной и молярной подвижностей, приводят к появлению различных релаксационных и ретардационных процессов при их движении и деформировании, каждый из которых связан с подвижностью тех или иных структурных элементов [3, 4]. Соответствующие молярным образованиям релаксационные и ретардационные процессы протекают относительно медленно, т.е. в этих средах более ярко проявляется деформационная инертность.

Проявление закономерности деформационной инертности в текучей вязко-инертной среде рассмотрим решая уравнение (2).

Решением уравнения (2) будет:

$$\dot{\gamma} = e^{\frac{f_1\mu_i}{f_2 m_{\ell i}}}\left(\dot{\gamma}_0 + \frac{1}{f_2 m_{\ell i}}\int \tau_{Kh} e^{-\frac{f_1\mu_i}{f_2 m_{\ell i}}}dt\right), \qquad (4)$$

где $\dot{\gamma}_0$ — начальная скорость деформации.

Если в решении (4) $\tau = \tau_0 = \mathrm{const}$, то получим:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau_c}{f_1\mu_i} + \left(\frac{\tau_0 - \tau_c}{f_1\mu_i}\right)\exp\left(-\frac{t}{t_{ret(Kh)}}\right), \qquad (5)$$

где $t_{ret(Kh)} = f_2 m_{\ell i}/f_1\mu_i$.

Если в уравнении (5) $\tau_c = \tau_0 = \mu\dot{\gamma}_0$, то мы имеем дело с равновесием как для жидкости Ньютона $\tau_c = \mu\dot{\gamma}$. Следовательно, ретардационная модель (2) является моделью жидкости, а его линейная плотность — плотностью молярных частиц жидкости. Если $\tau_c < \tau_0$, то скорость деформации постоянно уменьшается, если $\tau_c > \tau_0$, то скорость деформации возрастает с уменьшающейся скоростью. Если $t_{ret(Kh)}$ слишком велико, то вязкое последействие может восприниматься как медленный разгон жидкости, или же как неустановившееся течение.

При $t = \infty$ скорость деформации достигает значения τ_c/μ. Следовательно, скорость деформации в жидкости (5), описываемой ретардационной Моделью (2), развивается не мгновенно, задерживается вследствие вязкого преддействия при нагрузке, величина $t_{ret(Kh)}$ представляет собой время вязкого последействия.

Если снять напряжение $\tau_c = 0$, то скорость деформации по закону последействия при возврате (или обратного вязкого последействия) полностью исчезает при $t = \infty$.

Если $t_{ret(Kh)} = f_2 m_{\ell i}/f_1\mu_i$ не слишком велико, то процесс практически завершается по истечении конечного промежутка времени.

Как видно из анализа решения (5) ретардационной модели (2) такие жидкости обладают некоторым дополнительным сопротивлением относительно вязкой ньютоновской жидкости.

Это свойство текучих и деформируемых сред Хусановым И.Н. именовано деформационной инертностью.

3. Заключение

Таким образом, в данной статье предложены реологические модели состояния двухфазных сред и уравнения напряженно-деформационных состояний, учитывающие объемные содержания реологических свойств фаз. Решением ретардационной модели жидкости в виде двухфазной среды установлены не известные до настоящего времени объективно существующие процессы вязкого преддействия и последействия.

Список литературы

[1] Эйрих Ф. Реология, теория и приложения. М.: 1962. 824 с.

[2] Рейнер М. Реология. М.: 1965. 224 с.

[3] Хусанов И.Н. Математическая модель сжимаемой деформируемой сплошной среды с несколькими временами релаксации. М.: ВИНИТИ 10.11.84, № 60086-84 Деп. 21 с.

[4] Ризаев А.А., Хусанов И.Н. Деформационная инертность текучих сред // Журнал Композиционные материалы. 2002. № 4. С. 17Ч19.

[5] Лутфуллаев Ш.А., Хусанов И.Н. Механические модели ускоренно деформируемой среды и жидкостей со сложной реологией // Журнал Композиционные материалы. 2002. № 4. С. 34–36.

[6] Хусанов И.Н. О деформируемости сред по инерции. В сб.: Механика многофазных сред и тепломассообмен. Ташкент: Фан, 1987. С. 151–155.

[7] Хусанов И.Н. Обобщенная модель вязко-инертно деформируемой среды // Журнал Проблемы механики. 2008. № 1. С. 31–35.

[8] Рахматуллин Х.А. Прикладная математика и механика. М.: 1956. Т. 20. № 2.

[9] Файзуллаев Д.Ф. Ламинарное движение многофазных сред в трубопроводах. Ташкент: Фан УзССР, 1966.

[10] Нигматуллин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.

[11] Хусанов И.Н. О моделировании течений растворов, сминающих обсадные колонны // Узб. журнал «Проблемы механики». 2007. № 6. С. 39–43.

[12] Альфей Т., Гарин Е.Ф. Динамика вязко-упругого поведения. С. 459-507 в кн. Реология. Теория и приложения под ред. Ф. Эйриха. М.: 1962. 824 с.

[13] Бленд Д. Теория линейной вязко-упругости. М.: 1965. 200 с.

[14] Месчян С.Р. Ползучесть глинистых грунтов. Ереван: 1967. 320 с.

[15] Буевич Ю.А., Ясников Г.П. Релаксационные методы в исследованиях процессов переноса // ИФЖ, том XLIV. 1983. № 3. С. 483–504.