УДК 691.327-462:666.97.033.1

В. Н. ПИЛИПЕНКО
Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В БЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ ВИБРО-УДАРНОИМПУЛЬСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В статье рассматривается модифицированная цементная система при вибро-ударноимпульсном способе её уплотнения. Решается задача движения системы с учётом релаксационных процессов. Рассмотрен физический смысл релаксационных процессов, происходящих при вибро-ударноимпульсной деформации, и определён характер внутренних переменных. Получена полная система уравнений, описывающая течение модифицируемой цементной системы бетонной смеси в процессе вибро-ударноимпульсного уплотнения.

модифицированная бетонная смесь, вибро-ударноимпульсный способ уплотнения, релаксационные процессы, феноменологические уравнения движения

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

По сравнению с течением ньютоновских жидкостей течение модифицированной бетонной смеси при вибро-ударноимпульсной деформации обладает рядом особенностей. Так, при простом сдвиге в модифицированной бетонной смеси возникают нормальные напряжения, что не наблюдается в ньютоновских жидкостях. Вязкость модифицированных цементных систем зависит не только от приложенных напряжений (или градиентов скорости), но и от вида течения. При простом сдвиге вязкость, как правило, уменьшается, а при простом растяжении – увеличивается. При нестационарном движении системы также наблюдается ряд «неклассических» эффектов [1].

ЦЕЛЬ И ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Если известны внутренние параметры, характеризующие систему, определяющее уравнение может быть установлено с необходимой точностью. Однако в общем случае мы не можем установить между тензором напряжений и тензором градиентов скорости универсальную связь, пренебрегая внутренними параметрами.

Следует отметить очевидные свойства жидкой фазы цементной системы нулевого ранга, определяющее уравнение которой в первом порядке имеет вид [1]

$$\sigma_{ik}(\xi,t) = -p\delta_{ik} + \varepsilon_0\xi\delta_{ik} + 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2\xi)v_{(ik)} \tag{1}$$

Поскольку жидкая фаза цементной системы обладает только скалярными внутренними переменными, которые изменяются с изменением плотности системы [1], вязкость при сдвиговой деформации не меняется.

$$\frac{d\xi}{dt} = -\frac{1}{\tau}(\xi - \xi_0) + (\alpha_1 + \alpha_2\xi)v_{ii}. \tag{2}$$

Неньютоновское поведение может обнаруживаться при других типах деформаций [2]. Сдвиговая вязкость жидкой фазы цементной системы нулевого ранга второго порядка зависит от градиента скорости, поскольку сдвиг приводит во втором порядке к появлению диагональных компонент тензора напряжений и одновременно к изменению объёма; это влечет за собой изменение значений внутренних параметров, определяющих измеряемую величину вязкости [3–5]. Особенностью жидкой фазы нулевого ранга является её изотропия в процессе течения.

Свойства жидкой фазы нулевого ранга не соответствуют свойствам модифицированной цементной системы хотя бы потому, что в процессе течения цементная система становится анизотропной и для её описания необходимо обращаться к системам более высокого ранга.

Не анализируя полученную систему уравнений для системы второго ранга в общем виде [1], выясним на основании представлений о строении цементной системы физический смысл релаксационных процессов, происходящих при вибро-ударноимпульсной деформации, и определим характер внутренних переменных [6].

При построении теории поведения цементной системы уплотняемой модифицированной бетонной смеси использовано то обстоятельство, что гидратированное цементное зерно является макросистемой, которую можно описывать с помощью феноменологических понятий: свободной энергии, коэффициента трения [7, 8].

Пусть рассматриваемая система состоит из гидратированных зёрен цемента с одинаковой плотностью. В цементной системе модифицированной бетонной смеси в равновесном состоянии гидратирующиеся зёрна цемента совместно с химическим модификатором образуют флокулы, размеры которых примем равными среднеквадратичному радиусу инерции $\overline{R}^2$. Можно ввести также эффективный радиус флокулы r^*, определив его как расстояние от центра флокулы, на котором плотность по сравнению с её значением в центре уменьшается вдвое. Эффективный радиус связан со среднеквадратичным радиусом соотношением.

$$r^* = 0{,}64\left(\overline{R}^2\right)^{1/2}. \quad (3)$$

Размеры флокул в цементной системе зависят от характера межмолекулярного взаимодействия и отличаются от размеров флокул, находящихся в цементном тесте обычной бетонной смеси. Но поскольку межмолекулярные взаимодействия в модифицированной цементной системе и обычном цементном тесте принципиально не различаются, можно полагать, что в равновесии указанные размеры существенно не различаются, то есть совпадают по порядку величины.

Между гидратирующимися зёрнами цемента действуют силы различной природы, что приводит к появлению лабильных флокул, имеющих конечное время жизни и соединяющих все зёрна в единую систему, в которой могут быть флокулы различного типа (отличающиеся временем жизни), связанные с определенным типом взаимодействия.

Таким образом, цементная система в процессе физического модифицирования может быть представлена эффективной системой с лабильными флокулами, число которых зависит от температуры, давления, приложенного напряжения. Рассмотрим подробнее закон изменения числа флокул одного из типов.

Пусть K – максимально возможное число флокул. Обозначим вероятность разрушения и вероятность образования флокул за единицу времени p^- и p^+. Тогда изменение числа флокул в единицу времени может быть найдено как разность между числом образующихся и разрушенных узлов.

$$\frac{dz}{dt} = -p^- z + (K - z)p^+. \quad (4)$$

Для стационарного случая отсюда находим

$$z_0 = \frac{p^+}{p^+ + p^-}K \approx \frac{p^+}{p^-}K. \quad (5)$$

Уравнение (4) можно записать в виде

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{1}{\tau}(z - z_0), \quad (6)$$

где $\tau = 1/(p^+ + p^-)$ – время релаксации, зависящее от приложенных градиентов скорости (или напряжений).

При малых градиентах скорости время релаксации может быть разложено по градиентам скорости. Тогда из формулы (6) с точностью до членов первого порядка по градиентам скорости получаем уравнение (2).

Итак, один из релаксационных процессов в модифицирующееся физически цементной системе представляет собой разрушение и образование флокул. Определение вероятности образования флокулы связано с рассмотрением её природы.

Таким образом, в первом приближении строение цементной системы описывается следующим величинами: среднеквадратичным значением радиуса инерции $\left\langle R^2 \right\rangle_0$ гидратирующегося цементного зерна; типом флокул, различающихся по их средним временам жизни; числом флокул, приходящихся на единицу объёма. Предположим, что рассматриваемая система состоит из цементных зёрен равного диаметра, а все флокулы имеют одинаковую природу и, следовательно, одинаковое время жизни.

Рассмотрим изменение размеров и формы флокул в потоке при вибро-ударноимпульсном способе уплотнения бетонной смеси.

Пронумеруем все цементные зёрна от 0 до *z*. Пусть s_i^α – расстояние между соседними зёрнами с номерами α-1 и α; r_i^α – координата α-й флокулы, так что $s_i^\alpha = r_i^\alpha - r_i^{\alpha-1}$.

Сформулируем прежде всего кинетическое уравнение для функции вероятности нахождения координат *z*+1 флокулы в пространстве при заданном значении тензора градиентов скорости v_{ik}. На каждую из флокул действует упругая сила

$$2T\kappa\left(s_i^{\alpha+1} - s_i^\alpha\right) = -2T\kappa A_{\alpha\gamma} r_i^\gamma \tag{7}$$

и сила гидродинамического сопротивления

$$X = \zeta\left(v_i^\alpha - w_i^\alpha\right), \tag{8}$$

где $v_i^\alpha = v_{ik} r_k^\alpha$ – скорость системы в месте, где находится α-я флокула при условии, если бы её там не было;

w_i^α – средняя скорость движения α-й флокулы;

κ – коэффициент упругости фазы между флокулами;

$\zeta = 6\pi\eta_{(s)}\alpha$ – коэффициент трения флокулы радиуса (α) в среде с вязкостью $\eta_{(s)}$.

Матрица $A_{\alpha\gamma}$ имеет вид

$$\left\| \begin{matrix} 1 & -1 & 0 & . & . & . & 0 \\ -1 & 2 & -1 & . & . & . & 0 \\ 0 & -1 & 2 & . & . & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & . & . & . & 1 \end{matrix} \right\| \tag{9}$$

Скорость перемещения гидратирующихся зёрен цемента определяется из условия равновесия сил, действующих на зерно, причём к реальным силам следует добавить эффективную силу.

$$F_{эф} = -T\frac{\partial \ln W}{\partial r_i^\alpha}. \tag{10}$$

Тогда уравнение непрерывности

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \sum_{\alpha,i}\frac{\partial\left(w_i^\alpha W\right)}{\partial r_i^\alpha} = 0 \tag{11}$$

для случая многих частиц приводит к искомому уравнению.

Считая вязкость цементной системы значительной, опускаем силу инерции и, приравнивая к нулю сумму сил (7), (8) и (10), находим выражение для средней скорости движения α-й флоккулы

$$w_i^\alpha = v_i^\alpha - \frac{2T\kappa}{\zeta}A_{\alpha\gamma}r_i^\alpha - \frac{T}{\zeta}\frac{\partial \ln W}{\partial r_i^\alpha}. \tag{12}$$

Из уравнения непрерывности (11) с использованием (12) находим кинетическое уравнение для пластичной модифицированной цементной системы

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \sum_\alpha\left[\frac{T}{\zeta}\frac{\partial^2 W}{\left(\partial r_i^\alpha\right)^2} - \left(v_{ik}r_k^\alpha - \frac{2T\kappa}{\zeta}A_{\alpha\gamma}r_i^\gamma\right)\frac{\partial W}{\partial r_i^\alpha}\right] + \frac{12T\kappa z}{\zeta}W. \tag{13}$$

Ортогональным преобразованием координат $r_i^\alpha = R_{\alpha\gamma}\rho_i^\gamma$ и $\rho_i^\gamma = R_{\beta\gamma}r_i^\beta$ матрица (9) может быть приведена к диагональному виду с приближенными главными значениями $\lambda_\alpha = \left(\pi^2\alpha^2\right)/z^2$. При этом в силу свойств преобразования справедливо соотношение

$$\sum_\alpha\left\langle\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha\right\rangle = \sum_\alpha\left\langle r_i^\alpha r_k^\alpha\right\rangle. \tag{14}$$

Выпишем суммы различных степеней характеристических чисел:

$$\sum_\alpha\lambda_\alpha = 2z;\ \sum_\alpha\lambda_\alpha^{-1} = \frac{z^2}{6};\ \sum_\alpha\lambda_\alpha^{-2} = \frac{z^4}{90}.$$

Уравнение (13) в новых координатах приобретает вид

$$\frac{\partial W}{\partial t}=\sum_{\alpha}\left[\frac{T}{\zeta}\frac{\partial^2 W}{\left(\partial\rho_i^\alpha\right)^2}-\left(v_{ik}\rho_k^\alpha-\frac{2T\kappa\lambda_\alpha}{\zeta}\rho_i^\alpha\right)\frac{\partial W}{\partial\rho_i^\alpha}\right]+\frac{6T\kappa\lambda_\alpha}{\zeta}W. \tag{15}$$

Умножая уравнение (15) на $\rho_i^\gamma\rho_k^\gamma$ и интегрируя по всем переменным, находим для моментов функции распределения второго порядка $\left\langle\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha\right\rangle=\int W\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha d\rho$ следующую систему уравнений

$$\frac{d\left\langle\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha\right\rangle}{dt}=-\frac{1}{\tau_\alpha}\left(\left\langle\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha\right\rangle-\left\langle\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha\right\rangle_0\right)+v_{ij}\left\langle\rho_k^\alpha\rho_j^\alpha\right\rangle+v_{kj}\left\langle\rho_i^\alpha\rho_j^\alpha\right\rangle, \tag{16}$$

где $\tau_\alpha=\dfrac{\zeta}{4T\kappa\lambda_\alpha}$ – время релаксации;

$\left\langle\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha\right\rangle_0=\dfrac{1}{2\kappa\lambda_\alpha}\delta_{ik}$ – равновесное значение моментов функции распределения.

Если градиенты скорости внезапно исчезают, моменты релаксируют по закону $\left\langle\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha\right\rangle-\left\langle\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha\right\rangle_0\approx e^{-t/\tau_\alpha}$.

Таким образом, здесь внутренними переменными являются тензорные моменты $\left\langle\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha\right\rangle$, закон изменения которых определяется системой (16). Система (16) обладает такой же структурой, как и феноменологическое уравнение [1]

$$\begin{gathered}\frac{d\,\xi_{ik}}{d\,t}=-\frac{1}{\tau}\left(\xi_{ik}-\xi_{ik}^0\right)+\beta_1\delta_{ik}v_{ss}+\beta_2 v_{(ik)}+\beta_3\xi_{ss}v_{(ik)}+\beta_4\delta_{ik}\xi_{js}v_{js}+\beta_5\xi_{jj}\delta_{ik}v_{ss}+\beta_6\xi_{ik}v_{ss}+\\+\beta_7\left(\xi_{is}v_{sk}+\xi_{ks}v_{si}\right)+\beta_8\left(\xi_{is}v_{ks}+\xi_{ks}v_{is}\right)\end{gathered}, \tag{17}$$

однако некоторые члены уравнения (17) в рассматриваемом случае исчезают.

Найдем решение системы (16) для простого сдвигового потока (v_{12} = 0). При этом система (16) приобретает вид (индекс зерна для простоты написания опущен)

$$\begin{gathered}\frac{d\left\langle\rho_1^2\right\rangle}{dt}=-\frac{1}{\tau}\left(\left\langle\rho_1^2\right\rangle-\left\langle\rho_1^2\right\rangle_0\right)+2v_{12}\left\langle\rho_1\rho_2\right\rangle;\\ \frac{d\left\langle\rho_2^2\right\rangle}{dt}=-\frac{1}{\tau}\left(\left\langle\rho_2^2\right\rangle-\left\langle\rho_2^2\right\rangle_0\right);\\ \frac{d\left\langle\rho_3^2\right\rangle}{dt}=-\frac{1}{\tau}\left(\left\langle\rho_3^2\right\rangle-\left\langle\rho_3^2\right\rangle_0\right);\quad \frac{d\left\langle\rho_1\rho_2\right\rangle}{dt}=-\frac{1}{\tau}\left\langle\rho_1\rho_2\right\rangle+v_{12}\left\langle\rho_2^2\right\rangle\\ \frac{d\left\langle\rho_1\rho_3\right\rangle}{dt}=-\frac{1}{\tau}\left\langle\rho_1\rho_3\right\rangle+v_{12}\left\langle\rho_2\rho_3\right\rangle;\quad \frac{d\left\langle\rho_2\rho_3\right\rangle}{dt}=-\frac{1}{\tau}\left\langle\rho_2\rho_3\right\rangle\end{gathered} \tag{18}$$

Решение выписанной системы имеет вид

$$\begin{gathered}\left\langle\rho_1^2\right\rangle=\left\langle\rho_1^2\right\rangle_0\left[1+2\tau^2v^2{}_{12}\left(1-e^{-t/\tau}-\frac{t}{\tau}e^{-t/\tau}\right)\right],\\ \left\langle\rho_1\rho_2\right\rangle=\left\langle\rho_1^2\right\rangle_0\tau v_{12}\left(1-e^{-t/\tau}\right),\\ \left\langle\rho_2^2\right\rangle=\left\langle\rho_2^3\right\rangle=\left\langle\rho_2^2\right\rangle_0=\left\langle\rho_3^2\right\rangle_0;\ \left\langle\rho_1\rho_3\right\rangle=\left\langle\rho_2\rho_3\right\rangle=0.\end{gathered} \tag{19}$$

Выражение для $\left\langle\rho_i^\alpha\rho_k^\alpha\right\rangle$ может быть вычислено непосредственно после определения функции распределения. Окончательный результат для стационарного случая с точностью до членов второго порядка по градиентам скорости

$$\left\langle\rho_I^\alpha\rho_K^\alpha\right\rangle=\frac{1}{2\kappa\lambda_\alpha}\left[\delta_{IK}+2\tau_\alpha v_{(ik)}+2\tau_\alpha^2\left(2v_{(si)}v_{(sk)}-v_{(si)}v_{[sk]}-v_{(sk)}v_{[si]}\right)+\ldots\right]. \tag{20}$$

Характеристикой флокулы деформируемой цементной системы как целого может служить диада

$$\left\langle R_iR_k\right\rangle=\frac{1}{z}\sum_{\alpha}\left\langle r_i^\alpha r_k^\alpha\right\rangle, \tag{21}$$

которая, согласно (14) и (20), через градиенты скорости в стационарном случае записывается следующим образом

$$\left\langle R_i R_k \right\rangle = \frac{z}{12\kappa}\left[\delta_{ik} + \frac{\zeta z^2}{30\kappa T}v_{(ik)} + \frac{\zeta^2 z^4}{1260T^2\kappa^2}\left(2v_{(si)}v_{(sk)} - v_{(si)}v_{[sk]} - v_{(sk)}v_{[si]}\right) + \ldots\right]. \tag{22}$$

Функция распределения плотности цементной системы, очевидно, удовлетворяет условиям $\int \rho(r)\,dr = m\int \rho(r)\,r_i r_k dr = m\left\langle R_i R_k \right\rangle$, где m – масса гидратирующейся цементной частицы. Аппроксимируя ρ(r) гауссовой функцией, из формул (22) в системе координат, где диада $\left\langle R_i R_k \right\rangle$ диагональна, получаем

$$\rho(r) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{3/2} \frac{m}{\left(\left\langle R_1^2\right\rangle\left\langle R_2^2\right\rangle\left\langle R_3^2\right\rangle\right)^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{3}\frac{r_i^2}{\left\langle R_i^2\right\rangle}}. \tag{23}$$

Очевидно, что функция распределения плотности может быть аппроксимирована трёхосным эллипсоидом. Определяя эффективные размеры эллипсоида по уменьшению плотности вдвое, находим полуоси $a_{(i)} = 1{,}10\left\langle R_i^2\right\rangle^{1/2}$ и эффективный объём гидратирующегося цементного зерна $\Omega = 5{,}6\left(\left\langle R_1^2\right\rangle\left\langle R_2^2\right\rangle\left\langle R_3^2\right\rangle\right)^{1/2}$, который зависит от градиентов скорости. Разложение эффективного объёма по градиентам скорости не содержит членов первого порядка, поскольку $v_{ik} = 0$. Отсюда следует, что при очень малых градиентах скорости флокула деформируется в потоке без изменения объёма, а затем с возрастанием градиента скорости объём флокулы увеличивается.

Если градиенты скорости отсутствуют, все недиагональные компоненты $\left\langle R_i R_k \right\rangle$ равны нулю, а диагональные становятся равными друг другу. При этом функция распределения плотности переходит в сферически-симметричную функцию

$$\rho(r) = m\left(\frac{3}{2\pi\left\langle R^2\right\rangle_0}\right)^{3/2} e^{-\frac{3}{2}\frac{r^2}{\left\langle R^2\right\rangle_0}}. \tag{24}$$

Дополнительная диссипация энергии в деформируемой цементной системе происходит за счёт связанности точечных центров трения в единое целое. Это означает наличие в жидкой фазе дополнительных точечных сил, распределенных по объёму.

Усредненный тензор напряжений системы σ_{ik} может быть вычислен через среднее значение тензора потока импульса [4] $\sigma_{ik} = \rho v_i v_k - \Pi_{ik}$. Здесь все величины средние. Не усредненные величины обозначим штрихом.

В линейном по скорости (стоксовом) приближении

$$\sigma_{ik} = \frac{1}{V}\int \sigma'_{ik}\,dV. \tag{25}$$

Пусть плотность объёмных сил, действующих на деформируемую цементную систему $\sigma_i(x)$, тогда закон сохранения импульса имеет вид

$$\frac{\partial(\rho v'_i)}{\partial t} + \frac{\partial \Pi'_{il}}{\partial x_l} = \sigma_i(x). \tag{26}$$

Подстановка выражения для тензора потока импульса приводит к формуле

$$\frac{\partial(\rho v'_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v'_i v'_l)}{\partial x_l} = \frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_i} + \sigma_{i(x)}. \tag{27}$$

Пренебрегая в уравнении (27) инерционными членами, получаем

$$\frac{\partial \sigma'_{il}}{\partial x_l} = -\sigma_{i(x)}. \tag{28}$$

Чтобы найти усредненное значение тензора напряжений, умножаем обе части уравнения (28) на x_k, интегрируем по объёму $\int \frac{\partial \sigma'_{il}}{\partial x_l} x_k dV = -\int \sigma_i x_k dV$ и расписываем левую часть последнего соотношения

$$\int \frac{\partial(\sigma'_{il} x_k)}{\partial x_l} dV - \int \sigma'_{ik} dV = -\int \sigma_i x_k dV. \tag{29}$$

Первый интеграл в левой части уравнения (29) преобразуем в интеграл по поверхности тела и получим $\oint \sigma'_{il} x_k df_l - \int \sigma'_{ik} dV = -\int \sigma_i x_k dV$.

Таким образом, находим среднее значение тензора напряжений

$$\sigma_{ik} = \frac{1}{V}\int \sigma'_{ik} dV = \frac{1}{V}\oint \mathrm{P}_i x_k df + \frac{1}{V}\int \sigma_i x_k dV. \tag{30}$$

где P – сила, действующая на единицу площади поверхности объёма.

Первый интеграл справа в уравнении (30) представляет собой тензор напряжений, связанный только с поверхностными силами, и поэтому выражение (30) может быть переписано в виде

$$\sigma_{ik} = \sigma^0_{(ik)} + \frac{1}{V}\int \sigma_i x_k dV, \tag{31}$$

где $\sigma^{(0)}_{ik}$ – тензор напряжений при отсутствии объёмных сил, а последний член в выражении (31) описывает дополнительные напряжения, возникающие при добавлении объемных сил с плотностью σ_i.

Силы, действующие на жидкую фазу в рассматриваемом случае цементной системы, можно считать точечными. Следовательно, плотность сил

$$\sigma_i(x) = \sum_{a_\alpha} \psi_i^{a_\alpha} \delta\left(q_k^a + r_k^{a_\alpha} - x_k\right), \tag{32}$$

где q_k^a – координата центра масс а-й флокулы цементной системы;
$r_k^{a_\alpha}$ – координата a_α-й флокулы;
$\psi_i^{a_\alpha}$ – сила, действующая на α-е гидратирующееся зерно цемента a_α-флокулы.

Вычисляя с помощью (32) интеграл в выражении (31), получим

$$\int \sigma_i x_k dV = \sum_a q_k^a \sum_\alpha \psi_i^{a_\alpha} + \sum_{a_\alpha} \psi_i^{a,\alpha} r_k^\alpha. \tag{33}$$

В пределах одной флокулы $\sum_\alpha \psi_i^{a_\alpha} = 0$. Далее, поскольку все флокулы считаем одинаковыми, в последнем слагаемом суммирование по флокулам может быть заменено умножением на число флокул, и поэтому

$$\frac{1}{V}\int \sigma_i x_k dV = n\sum_\alpha \psi_i^\alpha r_k^\alpha, \tag{34}$$

где n – число флокул в единице объёма.

Полученное выражение описывает дополнительные напряжения, вызванные наличием связанных центров трения при их мгновенном положении.

Для связанных флокул с общим объёмом φ объёмные силы исчезают, когда скорости флокул и скорость потока в точке, где находится флокула, совпадают. Это произойдет тогда, когда связи между флокулами исчезнут, система тиксотропно разжижается, тензор напряжений которой возможно определить и, следовательно, для такой цементной системы

$$\sigma^{(0)}_{ik} = -p\delta_{ik} + 2\eta_{(s)}(1+1{,}5\varphi)v_{(ik)}. \tag{35}$$

Сила, действующая на жидкую фазу, равна по величине и обратная по знаку силе, с которой жидкая фаза действует на зерно цемента

$$\psi_i^\alpha = -\zeta\left(v_i^\alpha - w_i^\alpha\right) \tag{36}$$

и, таким образом, добавочный член после усреднения приобретает вид

$$-n\zeta\sum_\alpha \left\langle \left(v_i^\alpha - w_i^\alpha\right) r_k^\alpha \right\rangle, \tag{37}$$

где скобки, как и ранее, обозначают усреднение по координатам всех флокул с помощью функции распределения. Используя выражения (12) и (15), вычисляем значение (35) и записываем тензор напряжений для деформируемой цементной системы в виде

$$\sigma_{ik} = -p\delta_{ik} + 2(1+1{,}5\varphi)\eta_{(s)}v_{(ik)} + \frac{1}{2}n\zeta\sum_\alpha \frac{1}{\tau_\alpha}\left(\left\langle \rho_i^\alpha \rho_k^\alpha \right\rangle - \left\langle \rho_i^\alpha \rho_k^\alpha \right\rangle_0\right). \tag{38}$$

Найденное определяющее уравнение является частным случаем общего выражения [1] с тензорным внутренним параметром.

$$\begin{aligned}\sigma_{ik}\left(\xi_{js},t\right) &= -p\delta_{ik} + q\xi_{jj}\delta_{ik} + \mu\left(\xi_{ik} - \xi^0_{ik}\right) + \zeta_1\delta_{ik}v_{ss} + \zeta_2 v_{(ik)} + \zeta_3\xi_{ss}v_{(ik)} + \\ &+ \zeta_4\delta_{ik}\xi_{js}v_{js} + \zeta_5\xi_{jj}\delta_{ik}v_{ss} + \zeta_6\xi_{ik}v_{ss} + \zeta_7\left(\xi_{is}v_{sk} + \xi_{ks}v_{si}\right) + \zeta_8\left(\xi_{is}v_{ks} + \xi_{ks}v_{is}\right) + \\ &+ \zeta_9\left(\xi_{is}v_{sk} - \xi_{ks}v_{si}\right) + \zeta_{10}\left(\xi_{is}v_{ks} - \xi_{ks}v_{is}\right) - \tfrac{2}{3}\left(\zeta_9 + \zeta_{10}\right)\xi_{ss}v_{[ik]}.\end{aligned} \tag{39}$$

Соотношения (16) и (36) вместе с уравнениями движения и непрерывности образуют полную систему уравнений, описывающую течение модифицируемой цементной системы бетонной смеси в процессе вибро-ударноимпульсного уплотнения.

ВЫВОДЫ

На основании результатов экспериментально-теоретических исследований:

1. Определен физический смысл релаксационных процессов и характер внутренних переменных в процессе виброударно-импульсной деформации.

2. Построена теория поведения цементной системы уплотняемой модифицированной бетонной смеси, где гидратированное цементное зерно является макросистемой, которую можно описывать с помощью феноменологических понятий: свободной энергии и коэффициента трения. Цементная система бетонной смеси в процессе физического модифицирования представлена в виде эффективной системой с лабильными флокулами, число которых зависит от температуры, давления и приложенного напряжения.

3. Получено определяющее уравнение, являющееся частным случаем общего выражения с тензорным внутренним параметром. Полученные уравнения вместе с уравнениями движения и непрерывности образуют полную систему уравнений, описывающую течение модифицируемой цементной системы бетонной смеси в процессе виброударно-импульсного уплотнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилипенко, В. Н. Процессы в деформируемой модифицированной бетонной смеси вибро-ударноимпульсным способом уплотнения [Текст] / В. Н. Пилипенко // Вісник Східноукраїнського національного університет ім. Володимира Даля. – 2012. – № 5 [176], ч. 2. – С. 109–116.
2. Циглер, Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды [Текст] / Г. Циглер. – М. : Мир, 1976. – 315 с.
3. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 900 с.
4. Черный, Л. Т. Релятивистские модели сплошных сред [Текст] / Л. Т. Черный. – М. : Наука, 1988. – 288 с.
5. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения [Текст] / Г. Уоллис. – М. : Мир, 1982. – 456 с.
6. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред [Текст]. В 2-х ч. Часть 1 / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – 414 с.
7. Фізіко-хімічна механіка будівельних матеріалів: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів [Текст] / В. І. Братчун, В. О. Золотарев, М. К. Пактер, В. Л. Беспалов; під редакцією д. т. н. В. І. Братчуна. – Вид. 2-ге, перероб. і доповн. – Макіївка-Харків : Донбас, 2011. – 336 с.
8. Bazhenov, Yu. M. Modern technology of concrete [Текст] / Yu. M. Bazhenov // Technologies of concretes. – 2005. – № 1. – P. 6–8.

Получено 27.12.2012

В. М. ПИЛИПЕНКО

РЕЛАКСАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В БЕТОННІЙ СУМІШІ ПРИ ВІБРО-УДАРНОІМПУЛЬСНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

У статті розглядається модифікована цементна система при вібро-ударноімпульсному способі її ущільнення. Розв'язується задача руху системи з урахуванням релаксаційних процесів. Розглянуто фізичний зміст релаксаційних процесів, що відбуваються при вібро-ударноімпульсній деформації, і визначено характер внутрішніх змінних. Отримана повна система рівнянь, що описує перебіг модифікованої цементної системи бетонної суміші в процесі вібро-ударноімпульсного ущільнення.

модифікована бетонна суміш, вібро-ударноімпульсний спосіб ущільнення, релаксаційні процеси, феноменологічні рівняння руху

VOLODIMIR PILIPENCO

RELAX PROCESSES TAKING PLACE IN A CONCRETE MIX AT VIBRO IMPACT IMPULSE DEFORMATION

Dahl Easten Ukrainian National University

The modified cementing system at vibro impact impulsive way of its impaction is reviewed in this article. It is solved the task of system movement with the account of the relax processes. It has been examined the physical sense of relax processes taking place at vibro impact impulse deformation and it was defined the character of the internal variables. It has been received the complete system of equations describing the flow of modified cementing system of concrete mix in the process of vibro impact impulse impaction.
modified concrete mix, vibro impact impulse way of impaction, relax processes, phenomenological equations of movement

Пилипенко Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва і господарства Східно-українського національного університету ім. В. Даля. Наукові інтереси: розробка способів підвищення корозійної стійкості бетонних і залізобетонних конструкцій, що працюють в агресивних середовищах.

Пилипенко Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства Восточно-украинского национального университета им. В. Даля. Научные интересы: разработка способов повышения коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций, работающих в агрессивных средах.

Volodimir Pilipenco – PhD (Eng.), Associate Professor, Municipal Facilities and Construction Department, Dahl Easten Ukrainian National University. Scientific interests: development of methods of increase of inoxidizability of concrete and reinforced-concrete constructions working in aggressive environments.