



ДИНАМИКА УПЛОТНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ОБЪЕМА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

Исаев Е.А.

Херсонская государственная морская академия

В статье рассмотрен процесс уплотнения сыпучих материалов на основе теории консолидации. Описание динамики уплотнения тонкоизмельченного материала, осуществляемое в фазе «течения» материала и связанное с этим явление формоизменения. Для описания процессов динамики уплотнения гранул использован закон Дарси с учетом переменности коэффициента фильтрации в зависимости от коэффициента пористости образца, а также нелинейной зависимости «напряжение–деформация», возникающей при приложении нагрузки. В результате исследования получено, что в начале процесса гранулообразования, когда гранулообразуемая масса представлена в основном исходной шихтой и определенным процентом зародышей, прирост массы гранул возрастает примерно в 4 раза, а условия воздействия на гранулообразующую среду могут быть увеличены порядка до 100 раз.

Ключевые слова: гранулообразование, динамика уплотнения, динамическая нагрузка.

Постановка проблемы. Деформирование агрегатов или гранул происходит за счет перемещения частиц исходного материала, имеющих размеры от единиц до сотен микрометров, поэтому учет процессов, происходящих на этом уровне необходим при изучении явления формоизменения и уплотнения гранул.

Согласно одномерной классической теории консолидации сыпучих материалов, разработанной К. Терцаги, эффективные напряжения, возникающие при приложении одномерной нагрузки, рассматриваются как та часть полных продольных напряжений, которая определяет уплотнение скелета сыпучего материала. В любой момент времени (включая и кратковременное приложение нагрузки) в процессе уплотнения сумма напряжения, воспринимаемого жидкостью в порах материала (поровое напряжение U) и продольного эффективного напряжения P' равна полному осевому напряжению P [1]:

$$P = P' + U. \quad (1)$$

Влияние эффективного напряжения на скорость деформации для одномерной задачи зависит от пористости, характера анизотропии материала и условий (то есть «истории») его загрузки, а также от деформирования агрегата (или гранул) в прошлом. История деформирования включает в себя сведения о наличии и использовании сил притяжения между частицами и водными пленками, обволакивающими частицы.

Принцип эффективных напряжений широко распространен при решении пространственной задачи консолидации грунтов, характеризуемых любыми реологическими свойствами [2].

Вопросы одномерного уплотнения сыпучих материалов рассматривал К. Терцаги. Он вывел дифференциальные уравнения одномерной консолидации грунта. В общей форме дифференциальные уравнения одномерной консолидации грунта получены В. А. Флориным [3] и А. Шукле [4].

Изучение упруго-пластических характеристик увлажненного сыпучего материала, а также данные исследований [2] показывают, что первоначально силовое воздействие воспринимается поровой водой в исследуемом образце, оказывая упругое сопротивление смятию. Затем вода растекается, передавая давление скелету и защемленному между частицами воздуху, которые, воспринимая нагрузку, начинают перемещаться по капиллярам внутри зоны смятия, тем самым частично разрушают скелет, приводя к частичной деформации и воспринимая нагрузку на себя. При этом частицы переходят в места, занятые до приложения нагрузки поровой водой и воздухом. Процесс заканчивается тогда, когда перемещения отреагируют на все приложенное напряжение и система займет новое состояние равновесия.



Цель исследования – описание динамики уплотнения тонкоизмельченного материала, осуществляемое в фазе «течения» материала и связанное с ним явление формоизменения.

Результаты исследования. В механике сплошных сред основные уравнения напряженно-деформированного состояния получены на основе гипотезы сплошности грунта, то есть из предположения, что размеры структурных элементов образца во много раз меньше самого малого из рассматриваемых объемов.

Для описания процессов динамики уплотнения гранул используем закон Дарси с учетом переменности коэффициента фильтрации жидкости в зависимости от коэффициента пористости образца, а также нелинейной зависимости «напряжение-деформация», возникающей при приложении нагрузки.

При проведении исследования для описания процесса гранулообразования выделяем малый участок материала из зоны смятия агрегата (рис. 1). Можно считать, что до смятия размер составляет не более двух диаметров частиц гранулообразующего материала, а после смятия не менее диаметра исходных частиц, т.е.:

$$\begin{aligned} h_{\max} &\leq 4 \cdot r ; \\ h_{\min} &= 2 \cdot r , \end{aligned} \quad (2)$$

где r – радиус гранулообразуемой частицы.

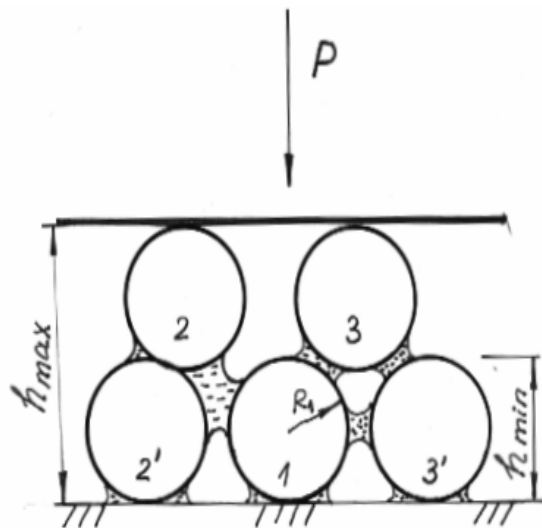


Рисунок 1 – Модель уплотнения формирований при ударном давлении P

Согласно выражению (1) приложенный ударный импульс P воспринимается скелетом (напряжение P') и поровой водой (напряжение U). При этом частица 1 как бы перемещается вверх, раздвигая частицы 2 и 3 до тех пор, пока они не займут положения 2' и 3' соответственно (рис. 1). В результате таких перемещений толщина элементарного слоя уменьшается до значения $2r$. При этом за счет уменьшения пористости за время dt уменьшается элементарный объем по выражению:

$$dV = -\frac{\partial n}{\partial t} \cdot 2 \cdot r \cdot dx \cdot dy \cdot dt . \quad (3)$$

Вместе с тем, уменьшение объема происходит за счет оттока воздуха и жидкости из слоя со скоростью соответственно \mathcal{Q}_a и $\mathcal{Q}_{ж}$. Учитывая сжимаемость воздуха в порах и пренебрегая его растворимостью в жидкости, запишем массу воздуха, отжимаемого в единицу времени из объема:



$$-\frac{\partial \rho \cdot \mathcal{G}_e}{\partial y} \cdot 2 \cdot r \cdot dx \cdot dy \cdot dt. \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха; \mathcal{G}_e – скорость течения воздуха.

Здесь знак минус учитывает уменьшение скорости перемещения воздуха с ростом ординаты. С другой стороны, изменение объема пор, заполненных воздухом за время dt , выражается:

$$\frac{\partial \rho \cdot n_e}{\partial t} \cdot 2 \cdot r \cdot dx \cdot dy \cdot dt, \quad (5)$$

где n_e – объем пор, заполненных воздухом.

Сумма выражений (4) и (5) с учетом преобразований дает условие неразрывности газовой среды:

$$\rho \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_e}{\partial y} + \frac{\mathcal{G}_e \cdot \partial \rho}{\partial y} + \rho \cdot \frac{\partial n_e}{\partial t} + n_e \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (6)$$

Аналогично можно записать условие неразрывности для жидкой и твердой фазы:

$$\frac{\partial n_{жс}}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{G}_{жс}}{\partial y} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial(1-n)}{\partial t} = -\frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial y}, \quad (8)$$

где $n_{жс}$ – объем пор, заполненных водой; n – пористость элементарного объема.

Суммируя выражения (6 ÷ 8), получим:

$$\frac{\partial}{\partial y} (\mathcal{G}_0 + \mathcal{G}_{жс} + \mathcal{G}_e) + \frac{\mathcal{G}_e}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{n_e}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (9)$$

В процессе смятия агрегата происходит относительное перемещение твердых частиц и поровой жидкости с воздухом. Тогда скорость движения твердых частиц относительно фильтрации жидкости, согласно обобщенному закону Дарси, принимает вид:

$$\bar{\mathcal{G}}_e - \bar{\mathcal{G}}_0 + \bar{\mathcal{G}}_{жс} = -\frac{k}{\gamma_{жс} \cdot n} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial y}, \quad (10)$$

где $\bar{\mathcal{G}}_0$ – средняя скорость перемещения; $\bar{\mathcal{G}}_{жс}$ – среднее значение скорости фильтрации относительно твердого; k – коэффициент фильтрации; $\gamma_{жс}$ – плотность поровой жидкости.

Учитывая, что:

$$\bar{\mathcal{G}}_{жс} = \frac{\mathcal{G}_{жс}}{n}; \bar{\mathcal{G}}_0 = \frac{\mathcal{G}_0}{1-n}; \bar{\mathcal{G}}_e = \frac{\mathcal{G}_e}{n_e},$$

в выражении (10) и, умножив на n , получим:

$$\frac{n \cdot \mathcal{G}_e}{n_e} - \frac{n \cdot \mathcal{G}_0}{1-n} + \frac{n \cdot \mathcal{G}_{жс}}{n_{жс}} = -\frac{k}{\gamma_{жс}} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (11)$$

Обозначим:



$$e_g = \frac{n_g}{n}; e_{жс} = \frac{n_{жс}}{n}; e = \frac{n}{1-n}; n = \frac{e}{1+e}, \quad (12)$$

где $e_{жс}$, e_g – доля воздуха, доля жидкости в порах соответственно; e – величина, характеризующая коэффициент пористости рассматриваемого объема.

С учетом (12) выражение (11) после дифференцирования принимает вид:

$$\frac{1}{e_g} \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_g}{\partial y} + \frac{1}{e_{жс}} \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_{жс}}{\partial y} - \mathcal{G}_0 \cdot \frac{\partial e}{\partial y} - e \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{1}{\gamma_{жс}} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right). \quad (13)$$

Здесь сделано допущение, что во время уплотнения соотношение между жидкостью и воздухом в порах остается без изменения, т.е. $e_g = const$, $e_{жс} = const$. Третий член левой части выражения (13) является произведением очень малых величин и поэтому при суммировании с тремя другими может быть опущен.

Преобразуем (13) следующим образом:

$$\frac{\partial \mathcal{G}_g}{\partial y} = e_g \cdot e \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial y} - \frac{e_g}{e_{жс}} \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_{жс}}{\partial y} - e_g \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\gamma_{жс}} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right). \quad (14)$$

Подставив значение $\frac{\partial \mathcal{G}_g}{\partial y}$ и (14) в выражение (9) и приравняв ввиду малости $\frac{\mathcal{G}_g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0$, имеем:

$$e_g \cdot e \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial y} - \frac{e_g}{e_{жс}} \cdot \frac{\partial \mathcal{G}_{жс}}{\partial y} - e_g \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\gamma_{жс}} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right) + \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{G}_{жс}}{\partial y} + \frac{\mathcal{G}_g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{n_g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (15)$$

Согласно (8)

$$\frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial y} = - \frac{\partial(1-n)}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t}. \quad (16)$$

Подставив (16) в (15), после элементарных преобразований получим:

$$(1 - e_a \cdot e) \cdot \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{G}_a}{\partial y} \cdot \left(1 - \frac{e_a}{e_a} \right) + \frac{n_a}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{n_a}{n} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\gamma_a} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = 0. \quad (17)$$

Учитывая уравнение состояния идеального газа:

$$V_g = \frac{P}{R \cdot T}, \quad (17)$$

для случая изменения изотермического режима с некоторым приближением можно записать:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{P_a} \cdot \frac{\partial P}{\partial t}.$$

Если начальное давление воздуха в порах $U_{ан}$, а избыточное U_0 , то:



$$P_e = U_{an} + U_a$$

и

$$\frac{1}{P_a} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{U_a + U_{ai}} \cdot \frac{\partial U_a}{\partial t} \quad (18)$$

Как показано в [3] избыточное давление распределяется в порах равномерно, т.е.:

$$U_a = U; U_{an} = U_0. \quad (19)$$

Кроме того,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{G}_{жс}}{\partial y} &= -\frac{\partial n_{жс}}{\partial t} \cdot \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{1}{(n-1)^2} \cdot \frac{\partial n}{\partial t}, \\ \frac{\partial n_{жс}}{\partial t} &= h_{мс} \cdot \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial t} = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Учитывая (18), выражение (17) представим в виде:

$$\begin{aligned} (1 + e_e \cdot e) \cdot (1 - n^2) \cdot \frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial n_{жс}}{\partial t} \cdot \left(1 - \frac{e_e}{e_{жс}}\right) + \\ + \frac{n_e}{U + U_0} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{n_e}{1 - n} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\gamma_{жс}} - \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right) = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Учитывая (12) и ввиду того, что:

$$e_{жс} = \frac{n_{жс}}{1 - n}; e_e = \frac{n_e}{1 - n}; n_{жс} = n - n_e; e = \frac{n}{1 - n}; s_{жс} = \frac{e_{жс}}{e}, \quad (22)$$

выражение (21) приведем к виду:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{(n - n_{жс}) \cdot \left\{ \frac{1}{1 - n} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{k}{s_{жс} \cdot \gamma_{жс}} \cdot \left(\frac{\partial P / \partial t - \partial P' / \partial t}{\partial n / \partial t} \right) \right] - \frac{1}{U_0 + U} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial P'}{\partial t} \right) \right\}^{(1-n)^2}}{n^2 \cdot (1 - s_{жс})} = 0 \quad (23)$$

Здесь $n_{жс}$ – относительный объем пор, заполненный жидкостью; n – пористость в момент времени t ; $\gamma_{жс}$ – плотность жидкости; $s_{жс}$ – степень водонасыщения рассматриваемого объема.

В период уплотнения пористость непрерывно уменьшается за счет выдавливания жидкости и воздуха.

Приравняв $U \approx \bar{U}$ и считая $\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = 0$, после несложных преобразований мы получим:

$$\frac{n^2}{(1 - n)^2} \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right)^3 = (1 - \nu \cdot \cos \gamma) \cdot \left\{ - \left[\frac{k}{s_{жс} \cdot \gamma_{жс} \cdot (1 - n)} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{a} \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right)^2 \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \right] \right\}, \quad (24)$$



где $a=U_0+U=const$; k – коэффициент фильтрации жидкости в порах агрегата (среды); P – напряжение от прикладываемого давления; ν – относительная доля непосредственно контактирующих частиц.

Величина a принимается в практических расчетах постоянной [3]. Анализ формулы (24) показывает, что чем больше жидкости в порах, $/S_{жс}/$, выше напряжение P и меньше сопротивление жидкости смещению частиц, тем выше скорость изменения плотности. Другими словами, для эффективного уплотнения целесообразно увеличить прикладываемые нагрузки с одновременным повышением увлажненности материала. Однако, как показывают результаты исследований, излишняя переувлажненность ведет к значительному снижению сцепления $F_{сц}$ взаимодействующих частиц.

Перепишем (24) в виде:

$$-\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{n^2 / (1-n)^2}{(1-\nu \cdot \cos \gamma) \cdot \left[\frac{k}{s_{жс} \cdot \gamma_{жс} \cdot (1-n)} \cdot \frac{\partial^2 n}{\partial y \partial t} + \frac{1}{a} \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right)^2 \right]} \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right)^3. \quad (25)$$

Знак минус отражает противоположность действия P и n .

Если $\frac{\partial^2 n}{\partial y \partial t} = s \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right)^2$, то окончательно можно записать:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{n^2}{(1-\nu \cdot \cos \gamma) \cdot \left[\frac{k \cdot s \cdot (1-n)}{s_{жс} \cdot \gamma_{жс}} \cdot \frac{\partial^2 n}{\partial y \partial t} + \frac{(1-n)^2}{U+U_0} \right]} \cdot \frac{\partial n}{\partial t}. \quad (26)$$

Анализ выражения (26) показывает, что чем более рыхлый материал, тем больше может быть величина P . Кроме того, чем больше влажность $/S_{жс}/$, тем больше должно быть давление P для компенсации порового напряжения.

Поскольку в практике гранулообразование чаще всего встречаются случаи производства гранул из переувлажненного материала, становится понятной целесообразность применения повышенных давлений на гранулообразующую среду в начале технологического процесса. В соответствии с реологическими основами механики дисперсных материалов давление может быть реализовано в виде постоянной величины, действующей за определенный промежуток времени, либо в виде кратковременных импульсных воздействий большой серии [2].

Анализ позволяет наметить также пути интенсификации процесса производства гранул путем рассмотрения гранулообразующего материала с позиций структурно-связанного тела с гибкими реологическими связями на уровне частиц, составляющих это тело.

Предпосылки, сформированные на основе исследований для вывода уравнения (26), и его анализ позволяют сделать заключение о том, что в процессе формирования гранул из сыпучей среды, последняя претерпевает значительные изменения как по увлажненности, так и по степени воздействия на нее статической импульсной нагрузки.

Но поскольку увлажненность (в данном случае имеется в виду объем жидкости в межчастичном пространстве по отношению к объему контактирующих частиц) изменяется, то и меняются упруго-вязкопластические свойства этой среды.

В результате расчета по выражению (26) установлена зависимость $\left| \frac{\Delta P}{\Delta n} \right| = f(n)$, представленная на рис. 2. Согласно рисунку, для большей пористости (меньшей плотности), можно приложить большее приращение давления для уплотнения гранул. Кроме того, приращение $\Delta P/\Delta n$ на интервале пористости 0,25...0,4 практически линейно и применение увеличения динамических нагрузок не приведет к разрушению гранул на



всем промежутке гранулообразования, т. е. приемлемо использование режима повышения динамических нагрузок (a) на всей длине барабана окомкователя, тем более, что пористость готовых гранул не должна быть меньше $0,25 \dots 0,28$, исходя из требований доменного производства. Другими словами, приращение массы за единицу времени гранулообразование в режиме ПДН значительно возрастает. Это легко подтверждается также и расчетами по выражению (10) из [5].

При этом значительно сокращается время гранулообразования, что влечет за собой рост производительности оборудования и повышения качества готовой продукции [6].

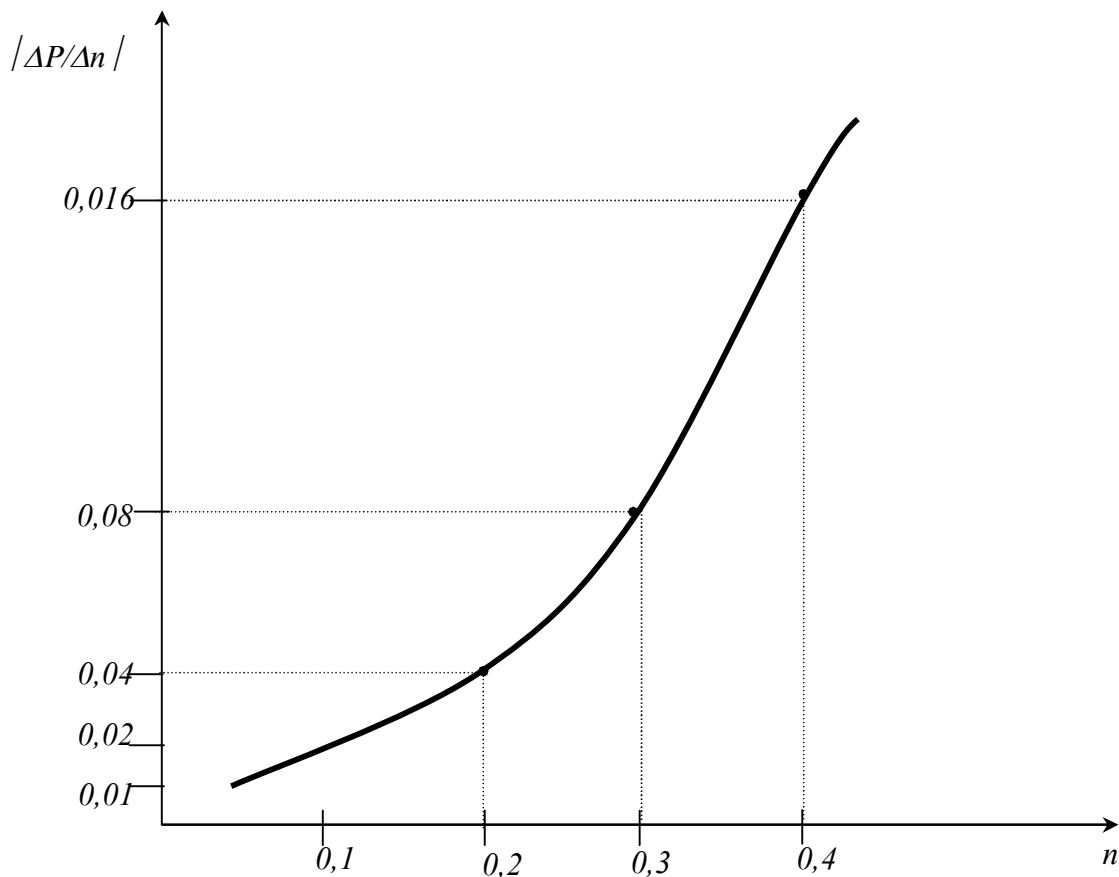


Рисунок 2 – Зависимость соотношения приращения ΔP и Δn на интервале пористости уплотненной среды

Выводы. Согласно расчетам в начале процесса гранулообразования, когда гранулообразуемая масса представлена в основном исходной шихтой и определенным процентом зародышей, прирост массы гранул возрастает примерно в 4 раза, а условия воздействия на гранулообразующую среду могут быть увеличены порядка до 100 раз.

Пик роста массы имеет место для частиц ~ 50 мкм с постепенным спадом до результата ~ 350 мкм. Эти теоретические расчеты подтверждаются практикой использования режима повышения динамических нагрузок при гранулообразовании.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование динамики процесса окомкования магнетитовых концентратов / [Нестеров Г. С., Урин В. Д., Юрин А. А., Васильева Ю. А.] // Окускование железных руд и концентратов. – Свердловск, 1976. – № 3. – С. 31-34.
2. Bhrany U. N. Entwurf und Betrieb von Pelletiertellern / U. N. Bhrany // Aufbereitung-Technik. – 1977. – № 12. – P. 641-647.
3. Динамика и механизм процесса окомкования шихты в цилиндрическом



барабане 3,2x12,5 м / [Коршиков Г. В., Невмержицкий Е. В., Левин С. Л., Хайков М. К.] // Сталь. – 1972. – № 3. – С. 4-10.

4. Мешик А. Ф. Движение сыпучего материала во вращающихся печах / А. Ф. Мешик // Научн. сообщ. НИИЦемент. – 1970. – № 23. – С. 21-23.

5. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1970. – 255 с.

6. Богдановский Л. Н. Механическая модель движения шихты во вращающемся барабане / Л. Н. Богдановский, Г. В. Коршиков. // Известия АН СССР : Металлы. – 1973. – № 1. – С. 5-8.

Ісаєв Є.О. ДИНАМІКА УЩІЛЬНЕННЯ ЕЛЕМЕНТАРНОГО ОБ'ЄМУ СИПКОВОГО МАТЕРІАЛУ

У статті розглянутий процес ущільнення сипких матеріалів на основі теорії консолідації. Опис динаміки ущільнення тонкоподрібненого матеріалу, який здійснюється у фазі «течії» матеріалу та пов'язане з цим явище зміни форми. Для опису процесів динаміки ущільнення гранул використаний закон Дарсі з урахуванням змінни коефіцієнта фільтрації залежно від коефіцієнта пористості зразка, а також нелінійної залежності «напруга–деформація», що виникає при навантаженні. У результаті дослідження отримано, що на початку процесу гранулоутворення, коли гранулоутворююча маса представлена в основному початковою шихтою і певним відсотком зародків, приріст маси гранул зростає приблизно в 4 рази, а умови дії на гранулоутворююче середовище можуть бути збільшені у порядку до 100 разів.

Ключові слова: гранулоутворення, динаміка ущільнення, динамічне навантаження.

Isaev E.A. DYNAMICS OF COMPRESSION OF ELEMENTARY VOLUME OF FRIABLE MATERIAL

In the article the process of compression of friable materials is considered on the basis of theory of consolidation. Description of dynamics of compression of fine-divided material, carried out in the phase of «flow» of material and the phenomenon of form change related to it. For description of processes of dynamics of compression of granules the law of Darcy is used taking into account changeability of coefficient of filtration depending on the coefficient of porosity of standard, and also nonlinear dependence «tension–deformation», arising up at an appendix loading. It is got as a result of research, that at the beginning of process of granuloobrazovaniya, when granuloobrazuemya mass is presented mainly by an initial charge and certain percent of embryos, the increase of mass of granules increases approximately in 4 times, and affecting terms granuloobrazuoyuoyu environment can be megascopic order to 100 times.

Keywords: granuloobrazovaniye, dynamics of compression, dynamic loading.

Статтю прийнято
до редакції 13.06.14.