

УДК 552.52, 624.131.54

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЛАГООБМЕНА В АГРЕГИРОВАННЫХ ПРИРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Г. С. Гончарова, М. Г. Храмченков
(НИИММ им. Н. Г. Чеботарева КГУ, г. Казань)

Рассматривается математическая модель влагообмена в агрегированных природных пористых средах (глинах, почвах и грунтах) с учетом неоднородной усадки пористой матрицы. Модель позволяет прогнозировать неблагоприятные последствия, имеющие место при складировании опасных отходов различных отраслей промышленности в прудах-накопителях или при долговременном хранении отходов в специальных хранилищах, когда возникающие зоны неоднородной усадки могут привести к развитию трещин в изолирующем слое материала (как правило, бентонитовых глинах). Новизна постановки задачи заключается в использовании нового уравнения для скорости усадки.

Ключевые слова: ненасыщенная фильтрация, агрегированные пористые среды, влагообмен, деформация, неоднородная усадка.

Введение

В связи с необходимостью долговременного безопасного хранения некоторых видов отходов, технология переработки которых в настоящее время отсутствует, встает вопрос о прогнозе защитных (буферных) свойств изолирующих материалов, используемых для предотвращения проникновения вредных веществ из мест их постоянного складирования (хранилищ). Одними из таких хранилищ являются различного типа пруды-накопители, в которых защита от проникновения вредных веществ обеспечивается покрытием дна и стенок материалом, обладающим малой проницаемостью (как правило, глинами). В других случаях речь идет об использовании специальных материалов (например бентонитовых глин) для создания естественного буфера при аварии. Однако протекающие в таких средах процессы естественного влагообмена могут привести к возникновению зон неоднородной усадки изолирующего материала и дальнейшему растрескиванию, что негативно скажется на его изолирующих свойствах. В силу этого необходимо более детальное моделирование процессов влагообмена в средах с неполным насыщением с учетом их усадки.

Одной из особенностей природных материалов, используемых в качестве естественных буферов, является их сложная структурная организация [1]. Последняя выражается в том, что частицы этих материалов представлены в виде агрегатов, содержащих, в том числе, удерживаемые поверхностными силами пленки воды [2], находящиеся в динамическом равновесии с капиллярной влагой (рис. 1,а). В силу этих причин агрегаты способны впитывать или выделять влагу при определенных условиях (сушка, набухание). Насыщенность S капилляров влагой изменяется от полной, принимаемой за единицу, до некоторого заданного условиями процесса значения S_* на выходе из слоя (рис. 1,б). При протекании процесса ненасыщенного влагообмена в такой среде возникает эффект дополнительной усадки за счет потери внутренней влаги агрегатами. Это неблагоприятно сказывается на целостности материала и, следовательно, на его изолирующих свойствах.

Вообще говоря, знание особенностей деформирования и влагообмена в агрегированных ненасыщенных пористых средах имеет большое значение для изучения процесса массопереноса как в технологии (производство лекарств, строительных материалов, экстракция), так и в природных

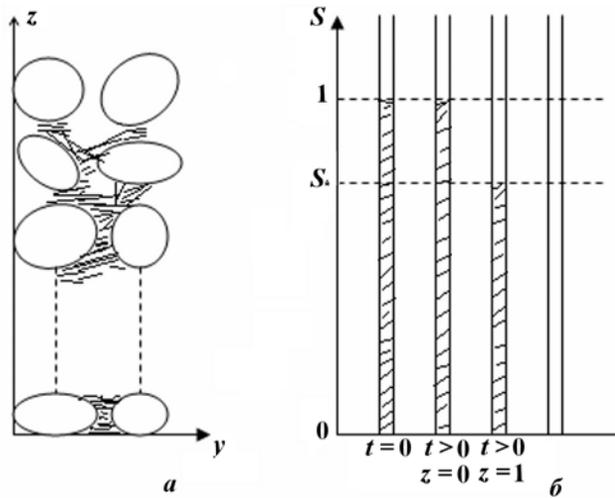


Рис. 1. Схема строения агрегированной ненасыщенной пористой среды (а); интервал изменения насыщенности объема капилляров среды влагой и начальное влагосодержание (б)

системах (глинистые породы, почвы, грунты). В большинстве случаев строение агрегатов пористой среды носит полидисперсный характер: агрегаты состоят из достаточно крупных частиц, пространство между которыми в различной степени заполнено частицами более мелкого размера. Подобное строение типично для некоторых видов грунтов, глин и почв.

Модель влагообмена в ненасыщенных агрегированных пористых средах

Рассмотрим процесс передвижения влаги под действием капиллярных и гравитационных сил в агрегированной среде с учетом обмена водой между влагой внутри агрегатов и капиллярной влагой. Поскольку при потере влаги объем агрегатов уменьшается, будет наблюдаться усадка среды в целом (в противном случае, при увеличении объема агрегатов за счет впитывания влаги, говорят о набухании). Таким образом, агрегированная ненасыщенная пористая среда представляет собой сложную систему: перемещение влаги в такой системе под действием гравитационных и капиллярных сил сопровождается дополнительно массообменом между внутриагрегатной и капиллярной влагой.

Запишем основные уравнения механики для данной системы.

Уравнение баланса влаги для агрегированной пористой среды в условиях неполного насыще-

ния влагой имеет вид [3]

$$-\frac{\partial(m(1-S))}{\partial t} + [1-m(1-S)] \frac{\partial \theta}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{q} = 0. \quad (1)$$

Здесь θ — общая усадка почвы; \vec{q} — скорость фильтрации; m — свободная пористость; S — водонасыщенность; t — время. Для простоты будем предполагать, что агрегаты среды сохраняют сферическую форму в ходе всего процесса. Это позволяет считать пористость в уравнении (1) постоянной.

Для связи усадки с капиллярным давлением запишем уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= -\alpha p_c, \quad \theta \leq \theta_c; \\ \Delta \theta &= 0, \quad \theta \geq \theta_c, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\alpha = \text{const}$; p_c — капиллярное давление; θ_c — критическое значение усадки, обусловленное конечными запасами влаги в агрегатах. Зависимость капиллярного давления от насыщенности дается формулой Аверьянова [4]

$$p_c(S) = -\frac{p_0 S_0}{S} \frac{1-S^3}{1-S_0^3}. \quad (3)$$

Здесь S_0 — остаточная насыщенность (насыщенность, при которой прекращается действие капиллярных сил на влагу в почве и движение влаги под действием капиллярных сил). При $S = 1$ давление p_c становится равным нулю. Для многих типов природных пористых сред $S = S_0$, $p_0 = 10^4 \text{ Па}$.

Уравнение для скорости движения влаги (далее рассматривается одномерный случай) в ненасыщенной пористой матрице имеет вид

$$q = k_w \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (4)$$

где $H = z - \psi$ — функция напора; ψ — высота всасывания. По известной формуле [5, 6] можно задать $k_w/k = \exp(-f\psi)$ при $f = n/H_k$. Здесь k — коэффициент фильтрации при полном насыщении; H_k , n — некоторые характерные значения. Для сравнительно однородных пород значение $n = 3 \div 4$.

Между высотой всасывания породы и ее влажностью существует однозначная связь, которая выражается в виде *основной гидрофизической характеристики* (ОГХ) \bar{S} :

$$\bar{S} = \frac{S - S_0}{1 - S_0} = \exp(-f\psi). \quad (5)$$

Для насыщенности S имеем согласно [5]

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -c \frac{\partial \psi}{\partial t} = c \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (6)$$

где $c = -\frac{\partial S}{\partial \psi}$ — гидрофизический параметр, называемый дифференциальной влагоемкостью и определяемый по ОГХ. В итоге получаем

$$\frac{\partial k_w(\psi)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_w(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = mc(\psi) \left(-\frac{\partial \psi}{\partial t} \right) + [1 - m(1 - S(\psi))] \alpha \psi \rho g. \quad (7)$$

Уравнение (7) решается численно.

Результаты расчетов

Были приняты следующие значения основных параметров: $m = 0,3$; $\rho = 1 \text{ г/см}^3$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $\rho_0 = 3 \cdot 10^4 \text{ Па}$; $S_0 = 0,1$; $S_* = 0,15$; $k = 1 \text{ м/сут}$; $n = 1,1$; $H_k = 3 \text{ м}$; $l = 10 \text{ м}$; $\alpha = 0,1 \cdot 10^{-7} \text{ см} \cdot \text{с/кг}$. Характерный вертикальный размер области (расстояние по оси z) делился на 100 участков, соответствующих шагу сетки.

Полученные авторами в результате расчетов по модели (1)–(7) зависимости, приведенные на рис. 2, 3, имеют достаточно стандартный для задач ненасыщенного влагопереноса вид.

На рис. 4 приводится график новой для подобных задач величины — скорости усадки в зависимости от высоты. Как видно из рисунка, эта

величина достигает максимальных значений в верхних точках слоя, что вполне согласуется с теми представлениями о механизме усадки агрегатов, которые изложены выше. При достижении значения усадки θ_c процесс влагообмена (массообмена) между порами и агрегатами заканчивается, что обуславливает появление заднего фронта процесса (вертикальные линии на рис. 4).

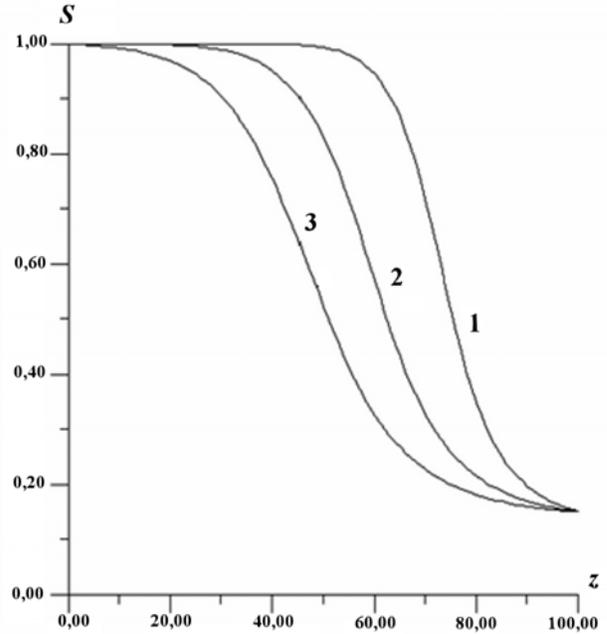


Рис. 3. Зависимость водонасыщенности от z : 1 — $t = 1/3$ сут; 2 — $t = 2/3$ сут; 3 — $t = 1$ сут

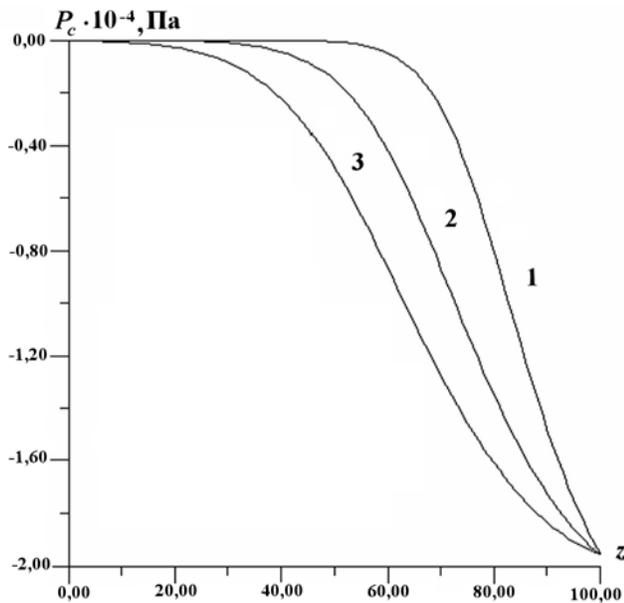


Рис. 2. Зависимость капиллярного давления от z : 1 — $t = 1/3$ сут; 2 — $t = 2/3$ сут; 3 — $t = 1$ сут

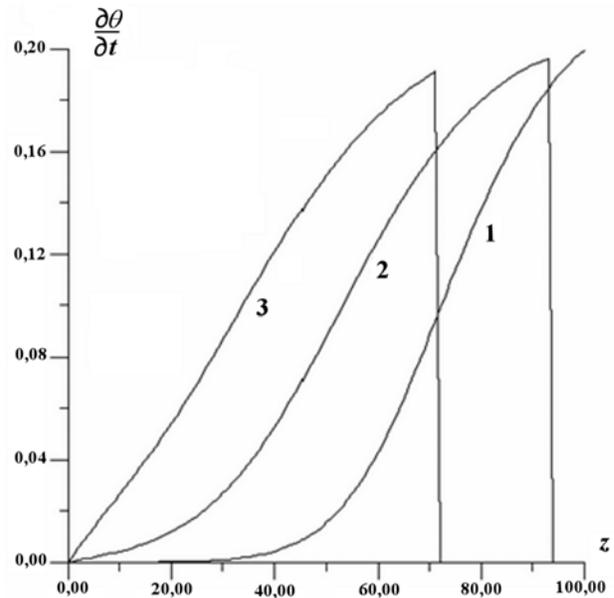


Рис. 4. Зависимость скорости усадки от z : 1 — $t = 1/3$ сут; 2 — $t = 2/3$ сут; 3 — $t = 1$ сут

На рис. 5 приведены зависимости осредненной по высоте усадки от времени для различных запасов внутриагрегатной влаги. Линия 1 соответствует запасу внутриагрегатной влаги, принятому за 100 %. Очевидно, что когда запас внутриагрегатной влаги больше 100 % (исходного значения), усадка слоя развивается медленнее, что также вполне согласуется с физикой процесса.

В целом процесс протекает с формированием зон неоднородной усадки по вертикали, что может привести в дальнейшем к формированию зон растрескивания и, следовательно, резкому росту проницаемости среды.

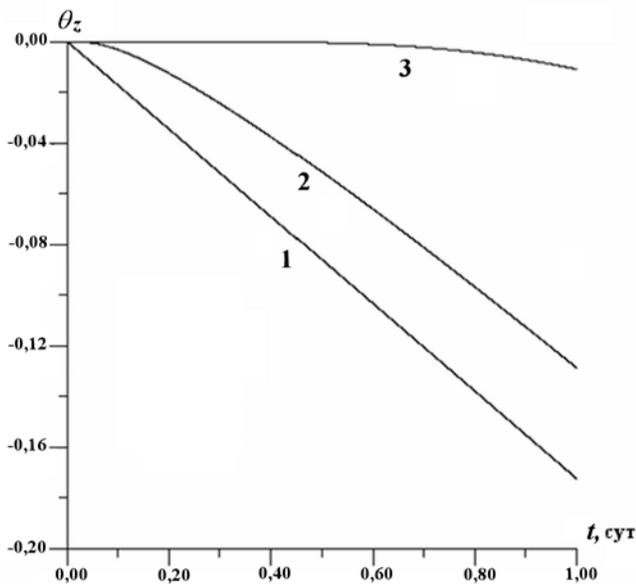


Рис. 5. Зависимость средней усадки от времени для различных запасов внутриагрегатной влаги: 1 — 100 %; 2 — 120 %, 3 — 200 % от исходного запаса

Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Построена модель влагообмена в агрегированных ненасыщенных природных средах (глины, почвы, грунты).

2. Решена одномерная задача о ненасыщенном влагопереносе в таких средах.

3. Показано, что процесс усадки в зависимости от запасов влаги в агрегатах изменяется с течением времени (появляется задний фронт процесса, на котором усадки нет). В целом процесс протекает с формированием зон неоднородной усадки по вертикали, что может привести в дальнейшем к формированию зон растрескивания и, следовательно, резкому росту проницаемости среды.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (гранты 3590, 3868).

Список литературы

1. Горькова И. М., Коробанова И. Г., Окнина Н. А., Реутова Н. С., Сафолина И. А., Чепник В. Ф. Природа прочности и деформационные особенности глинистых пород в зависимости от условий формирования и увлажнения. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
2. Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1987.
3. Фахрутдинова А. Н., Храмченков М. Г., Храмченкова Р. Х., Чекалин А. Н. Гидрофизические свойства и атмосферная функция почв // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 2. С. 58–64.
4. Кочина П. Я., Кочина Н. И. Гидромеханика подземных вод и вопросы орошения. М.: Физматлит, 1994.
5. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996.
6. Полубаринова—Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977.

Статья поступила в редакцию 21.04.09.