Моделирование процессов набухания в системе вода-порода: теория и эксперимент**Храмченков М.Г.***Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия, e-mail: mkhramch@gmail.com***Усманов Р.М.***Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия, e-mail: almightyhero@mail.ru*

АННОТАЦИЯ: В работе рассмотрена математическая модель процессов набухания в системе вода-порода. Процесс набухания рассмотрен как для случая фильтрации в полностью водонасыщенных горных породах, так и в горных породах зоны неполного насыщения (например, почвах и грунтах). Проведены экспериментальные исследования процесса набухания. Показано хорошее согласие теоретических и расчетных данных.

Simulation of swelling processes in water-rock systems: theory and experiment**Khramchenkov M.G.,***Kazan Federal University, Kazan, Russia, e-mail: mkhramch@gmail.com***Usmanov R.M.***Kazan Federal University, Kazan, Russia, e-mail: almightyhero@mail.ru*

ABSTRACT: The mathematical model of the processes of swelling in the water-rock system is considered. The swelling process is considered both for the case of filtration in completely water-saturated rocks and in rocks of the zone of incomplete saturation (for example, soils and soils). Experimental studies of the swelling process were conducted. Good agreement between theoretical and experimental data is shown.

ВВЕДЕНИЕ

Под набуханием горных пород обычно имеют в виду изменение (если мы говорим о набухании, то увеличение) объема пространства, занимаемого породой, в ходе физического связывания молекул воды минералами горных пород за счет межмолекулярного взаимодействия различной природы (электрического, ван-дер-ваальсового, адсорбционного). Чаще всего набухание горных пород имеет место в случае, когда в горной породе присутствуют минералы группы слоистых алюмосиликатов (глинистые минералы). Горные породы в этом случае относятся соответственно к глинистым горным породам. Глинистые минералы входят также в состав почв, способствуя формированию их вододерживающих свойств. Набухание глинистых пород обусловлено взаимодействием активных центров на поверхности глинистых частиц с молекулами воды и последующим формированием на поверхности моно- или многослойной сетки молекул воды. Учитывая полярный характер молекул воды, наиболее важную роль в процессе набухания будут играть электрически активные центры поверхности глинистых частиц, в частности, катионы-компенсаторы электрического заряда глинистых частиц [1]. Последние за счет формирования гидратной оболочки из молекул воды отделяются от собственно поверхности глинистых частиц, создавая тем самым условия для возникновения осмотического давления и дальнейшего набухания глинистых пород. Таким образом, способность к набуханию связана с гидрофильным характером поверхности глинистых минералов,

слагающих некоторые типы почв, грунтов и горных пород. Частицы глинистых минералов, обладающие большой удельной поверхностью, наиболее активно проявляют гидрофильные свойства. Поскольку набухание – результат гидратации межслоевых промежутков глинистых частиц, то ведет к формированию в породе или грунте рыхлосвязанной воды вокруг глинистых частиц. Молекулы воды уменьшают силы сцепления между ними, раздвигают их и этим вызывают увеличение объема почвы, грунта или горной породы. Частицы почвы, грунта или горной породы, как правило, объединяются в агрегаты, прочность которых обуславливает связность грунта в целом. Набухание тесно связано со связностью почвы, грунта или горной породы, поскольку уменьшение сцепления между частицами грунта ведет к потере связности грунта. Таким образом, набухание почв, грунтов или горных пород может привести к их частичной, а в некоторых случаях и полной дезинтеграции агрегатной структуры породы или грунта. Далее мы будем исходить из предположения, что процесс набухания носит, главным образом, осмотический характер. Причиной, вызывающей осмотическое набухание, является разница в концентрации примесей во внутриагрегатном растворе и в воде, окружающей набухающие агрегаты. Если концентрация внешнего по отношению к набухающим агрегатам раствора меньше суммарной (включающей и гидратированные катионы-компенсаторы электрического заряда глинистых частиц) концентрации раствора, находящегося во внутриагрегатных порах, проис-

ходит набухание породы (оно тем больше, чем больше разница концентрации этих растворов). Если же концентрация внешнего раствора больше концентрации порового раствора, то набухание может не происходить; в этом случае может наблюдаться сжатие породы, подобное тому, какое наблюдается при ее высыхании.

При увеличении объема грунта или горной породы в процессе набухания развивается определенное давление, которое называется давлением набухания.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАБУХАНИЯ В СИСТЕМЕ ВОДА-ПОРОДА

Введем обозначения: θ – дилатация, $\mathbf{q}$ – относительная скорость движения флюида в пласте (скорость фильтрации); k – проницаемость, m – пористость, μ – вязкость, p – давление, R – газовая постоянная, T – температура, Q – емкость обменных катионов, V_0 – начальный объем, V_s – объем твердой фазы, W – суммарная нагрузка на горную породу, u_i ($i = x, y, z$) – компоненты вектора смещения среды, ρ_s, ρ_w – плотности твердой фазы и воды соответственно, K, G – упругие постоянные. В работе [2] было показано, что уравнение баланса массы жидкости в полностью насыщенной водой пористой среде с набухающим скелетом в случае, когда изменением плотности связанной воды можно пренебречь, описывается уравнением вида

$$\partial \theta / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (1)$$

Для закона фильтрации и соотношения для давления набухания имеем

$$\mathbf{q} = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \quad k = \frac{k_0 m^3}{(1-m)^2}, \quad k_0 = \text{const} \quad (2)$$

$$RTQ / [V_0(1 + \theta_\infty) - V_s] = W$$

Связь дилатации и компонент вектора смещения описывается уравнением

$$\theta = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \text{div} \mathbf{U}, \quad \mathbf{U} = (u_x, u_y, u_z) \quad (3)$$

Для связи напряжений и деформаций в фильтрующей горной породе используется известное реологическое соотношение

$$\left(K + \frac{G}{3} \right) (\nabla(\text{div} \mathbf{U})) + G(\Delta \mathbf{U}) = \nabla(p + (\rho_s + \rho_w)gz). \quad (4)$$

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для подтверждения теории была собрана установка и выработана методика проведения исследований. Установка позволяла отслеживать и фиксировать особенности процесса набухания в ходе эксперимента, во время которого через однородную пористую среду шел радиальный фронт фильтрации и набухания. В эксперименте использовался сухой, не связный грунт с заранее известными характеристиками. Определялись его физические и физико-химические свойства. Искусственно в прозрачной камере формировалась пористая среда с определенными параметрами. В нижней части камеры находилось отверстие, через которое, под постоянным давлением подавалась дистиллированная вода. Фильтрация проходила снизу вверх. На определенных отметках грунт имел горизонтальные маркирующие полосы, при помощи которых фиксировались деформации. Для постоянного наблюдения велась непрерывная фотосъемка с частотой в 1 кадр в минуту. После завершения эксперимента фиксировалось изменение массы модели, для определения поступившей воды. Для определения масштаба на фотографии модель обладала мерной шкалой с шагом в 1 мм. На этапе обработки, помимо остальных данных, определялись количественные значения деформаций и время фильтрации и заданной величины набухания. После решения уравнений и сравнения с экспериментальными данными мы исследовали особенности нашей модели, которые важны для объяснения поведения набухающих глин. Показано, что полученные решения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Ниже изображен вид экспериментальной установки по насыщенной фильтрации в набухающем грунте (рис. 1).

Уравнение, описывающее поведение фронта набухания в этом случае, имеет вид [3]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{kRTQ \nabla \theta}{2\eta(V_0 - V_s) \left[\frac{V_0 - V_s}{2V_0} + \theta \right]} \right) \quad (5)$$

Это уравнение далее решалось численно и аналитически. Показано, что удастся отыскать точное решение данного уравнения [3]. Далее (рис.2) изображены результаты расчетов и их сравнение с экспериментальными данными.

Ниже приводится вид экспериментальной установки по изучению ненасыщенной фильтрации в набухающих и ненабухающих почвах и грунтах (рис. 3).

Рис. 1. Вид экспериментальной установки по насыщенной фильтрации в набухающем грунте

Рис. 2. Сравнение численного и аналитического решения уравнения (5) с экспериментальными данными

Рис. 3. Вид экспериментальной установки по изучению ненасыщенной фильтрации в почвах и грунтах

Изучался процесс капиллярного впитывания в колонках с набухающей почвой и ненабухающим мелкозернистым песком. Для моделирования процесса использовалась модифициро-

ванная формула Вашбуерна [4]. Далее (рис.4) изображены результаты экспериментальных исследований.

Рис. 4. Динамика изменения высоты капиллярного впитывания в песке (красная и синяя линии) и набухающей почве (серая линия)

Обращает на себя внимание, что на больших временах высота капиллярного подъема в образцах песчаной почвы перестает изменяться в полном соответствии с формулой Лапласа для этого случая (следствием формулы Вашбуерна для капиллярной пропитки ненабухающих пористых сред)

$$l_{\infty} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_0 \rho_w g} \quad (6)$$

Здесь $\sigma, \cos \theta$ - коэффициент поверхностного натяжения и косинус краевого угла смачивания соответственно, g - ускорение силы тяжести, r_0 - радиус пор.

Для набухающих почв формула Вашбуерна на больших временах приобретает вид

$$l_{\infty} = \frac{2m_0\sigma \cos \theta}{r_0\rho_w g [A + (A + m_0)\exp(-\chi t)]} \quad (7)$$

$$A = \frac{(\rho_s - \rho_w)gz_0m_0}{RTQ} - 1, \chi = \frac{\beta RTQ}{m_0}$$

Здесь z_0 - высота набивки, m_0 - исходная пористость, β - постоянная скорости набухания [5]. Видно, что соотношения (6) и (7) адекватно описывают поведение кривых капиллярного подъема воды (рис. 4).

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель насыщенной и ненасыщенной фильтрации воды в набухающих пористых средах (почвах и грунтах), которая основана на полученных ранее доказательствах представлений о необходимости использования уравнения баланса массы фильтрующейся жидкости и замыкающих термодинамических соотношений более сложного вида, чем для моделей течений в обычных пористых средах. Это связано с необходимостью учета изменения радиуса поровых каналов за счет набухания и изменения баланса сил, действующих на фильтрующийся поток жидкости. Данная модель реализуют различные варианты режимов течения с обострением и описывают формирование длительно существующих зон с измененной структурой фильтрационного потока. Направление по моделированию фильтрации в набухающих пористых средах является актуальным для различных разделов таких научных дисциплин, как физика почв, механика грунтов, геомеханика. Научный и практический интерес здесь вполне объясним. Дело в том, что фильтрация в набухающих пористых средах играет важную роль при влагопереносе в наиболее плодородных типах почв (черноземах) и формировании их водоудерживающих свойств. В этом случае приходится иметь дело с изменением структуры порового пространства за счет процессов набухания. Это приводит к активизации нового фактора усиления развития неустойчивости фронта пропитки (фактор изменения формы и размеров частиц пористой среды). Получены итоговые уравнения фильтрации в набухающих пористых средах, имеющие важное значение для количественного описания процессов, протекающих в почвах и грунтах, поры которых не однородны по своей структуре и не полностью насыщены влагой (ненасыщенных структурированных пористых средах), представляющее интерес том числе для ряда технологий (в частности, для технологий получения буровых растворов и подготовки строительного сырья). Постановка задачи выполнена для общего случая фильтрации в деформируемой под нагрузкой пористой

среде. Проанализировано поведение насыщенных и ненасыщенных набухающих пористых сред под нагрузкой. Получено уравнение, связывающее объемную деформацию среды с величиной приложенной нагрузки. Проведено сравнение полученных результатов расчетов с экспериментальными данными. Установлено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Изучен вопрос о влиянии изменения характера упаковки частиц на поведение среды под нагрузкой (механоактивация). В необходимом для замыкания модели уравнении для связи расклинивающего давления, капиллярного давления и приложенной нагрузки учитывается концентрация примесей в фильтрующемся растворе в транспортных порах почв и грунтов, которая влияет на адсорбционную составляющую расклинивающего давления. Таким образом, это позволяет проанализировать влияние химического состава фильтрующегося раствора на набухающие свойства пористой матрицы. Проведено экспериментальное исследование и расчет фильтрации воды в набухающей деформируемой почве в режиме полного насыщения. Эксперименты проводились в специально сконструированном фильтрационном лотке. Найдено аналитическое решение соответствующей краевой задачи, проведено его сравнение с численным решением задачи и экспериментальными данными. Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Отдельно решена задача о капиллярном подъеме воды в набухающей почве по модели Вашбурна. Выполнен эксперимент по капиллярному подъему воды в ненабухающих грунтах и набухающих почвах, продемонстрировано хорошее согласие рассчитанных по модели и полученных экспериментально данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств – М.: ГЕОС. 2013. 576 с.
2. Khrumchenkov E., Khrumchenkov M. Modeling of non-equilibrium mass-exchange processes in geo systems // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016 (86), pp. 1–4.
3. Khrumchenkov M.G., Khrumchenkov E.M., Usmanov M.R. Non-linear equations of mechanics of swelling and metamorphic processes // Lobachevskii Journal of Mathematics, 2019, Vol. 40, No. 12, pp. 2077–2083.
4. Washburn E.W. The dynamics of capillary flow // Phys. Rev. 1921. V. 17. P.273–283.
5. Храменков М.Г., Храменков Э.М., Петруха В.В. Оценка скорости набухания глинистых пород // Нефтяное хозяйство. –10 (2014). – С. 54–56.