© А.В. Дугарцыренов, 2007

УДК 622.233:622

А.В. Дугарцыренов

ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВЯЗНОЙ ПОРОДЫ

В механике грунтов широко используют различные модели, позволяющие наглядно представить процессы, происходящие в них при воздействии внешней нагрузки. Каждая из них моделирует деформирование грунта под внешней нагрузкой и в зависимости от степени сложности представляет собой ту или иную комбинацию фундаментальных моделей: идеально упругого тела или тела Гука (обозначается символом Н), идеально пластического тела Сен-Венана (STV), вязкого тела Ньютона (N). Ни одна из этих моделей не рассматривает природы деформирования грунтов. По вопросу о распределении внешней нагрузки между фазами грунта рассмотрим модель Терцаги [1], дополненную Н.Я. Денисовым [2] для водонасыщенной породы (рис. 1).

По представлениям К. Терцаги, в любой момент времени для грунтовой массы справедливо уравнение

$$P = P_э + P_н, \qquad (1)$$

где P - общее давление в некотором сечении породы; $P_э$ - давление на твердую фазу (скелет) породы, называемое в механике грунтов [3-6] эффективным давлением; $P_н$ - давление в поровой воде (нейтральное или поровое давление). Уравнение (1) положено в основу механики водонасыщенных грунтов. При неизменной нагрузке на грунт $P_э + P_н = const$ в течение всего процесса деформирования, хотя величины $P_э$ и $P_н$ изменяются по определенному закону. Согласно модели К. Терцаги – Н.Я. Денисова в первоначальный момент вся нагрузка воспринимается водой ($P = P_н$, $P_э = 0$), в процессе отжатия воды и деформирования грунта происходит непрерывное перераспределение нагрузки таким образом, что эффективное давление увеличивается (происходит сжатие пружины) с одновременным уменьшением нейтрального давления, и по окончании деформации нагрузка полностью воспринимается скелетом

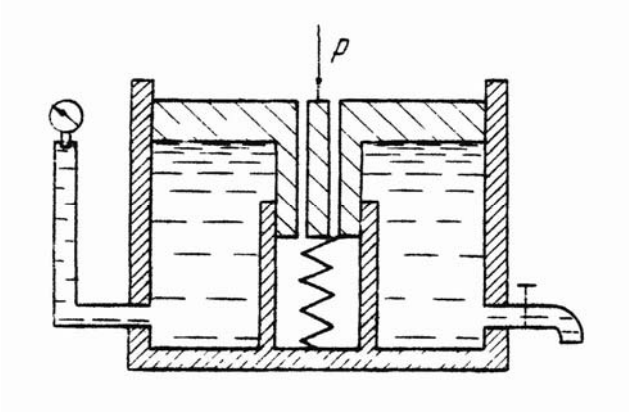

Рис. 1. Модель связной породы (по К. Терцаги – Н.Я. Денисову)

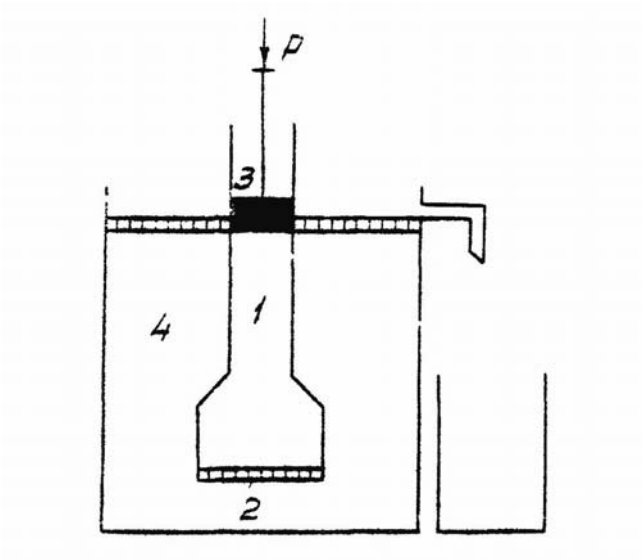

Рис. 2. Осмотическая модель водонасыщенной глины Л.И. Кульчицкого: *1* – трубка – осмометр с раствором соли; *2* – полупроницаемая мембрана; *3* – поршень для передачи на раствор внешнего давления; *4* – внешний сосуд с водой

($P = P_э$, $P_н = 0$). Аналогичное уравнение для 3-х фазного грунта было рассмотрено Бишопом [7]:

$$P = P_э + \left[P_г - \aleph\left(P_г - P_н\right)\right], \qquad (2)$$

где $P_г$ - давление газа в порах грунта; $\aleph$ - коэффициент, характеризующий связь между объемами воды и газообразной фазы грунта ($\aleph = 0$, $\aleph = 1$ соответственно для сухого и водонасыщенного грунта).

В работе [8], указано на ограниченность трактовки параметров $P_э$ и $P_н$ по К. Терцаги – Н.Я. Денисову. Л.И. Кульчицким [8] показано, что общее давление P полностью передается на воду, но поскольку вода в непосредственной близости от грунтовых частиц обладает химическим потенциалом, отличным от воды в объеме, то возникающее в силу этого расклинивающее давление препятствует сближению частиц. Уравнение (1) в такой интерпретации записывается следующим образом:

$$P = P_{раскл} + P_н$$

или

$$P = P_м + P_и + P_с + P_н, \qquad (3)$$

где $P_м$ - составляющая расклинивающего давления, вызванная вандерваальсовыми силами; $P_и$ - составляющая, обусловленная взаимодействием ионных оболочек частиц; $P_с$ - структурная компонента, связанная с перекрытием граничных фаз.

Для иллюстрации равновесия диализованной глинистой пасты Л.И. Кульчицким была разработана осмо-тическая модель водонасыщенной глины (рис. 2), представляющая собой сосуд с водой и опущенной в нее осмотической ячейкой, залитой рас-твором соли [8]. Состояние равновесия в данной модели описывается уравнением

$$P - P_{осм} = 0\,. \qquad (4)$$

При увеличении давления P вода из осмотической ячейки выдавливается через полунепроницаемую мембрану в сосуд. Соответственно, уменьшение растворителя (воды) в ячейке приводит к возрастанию кон-центрации раствора соли и естественно, к повышению осмотического давления в ячейке. Этот процесс происходит до тех пор, пока не будет выполнено соотношение (4).

Сравнивая осмотическую модель с механической моделью К. Терцаги-Н.Я. Денисова можно заметить, что послед-

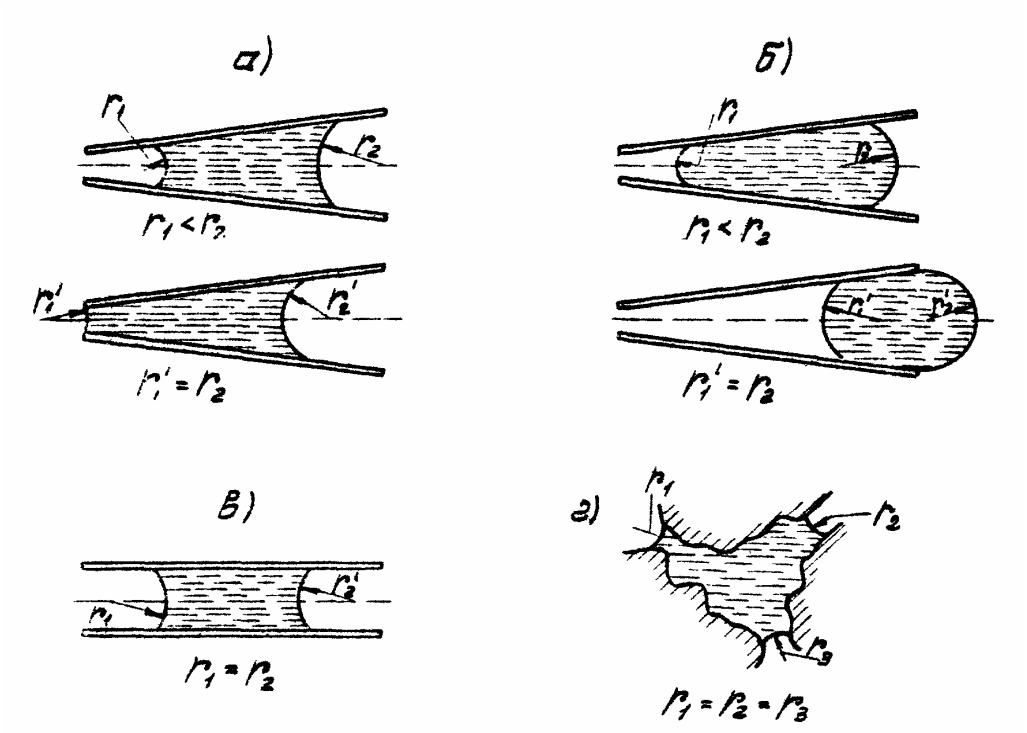

Рис. 3. Жидкость в капиллярах различной формы (коническом – а, б; цилиндрическом – в; произвольной конфигурации – г)

няя в отличие от первой не делает никаких различий между поведениями водонасыщенных песка и глины под действием внешней нагрузки, т.е. как ненабухающая, так и набухающая система частиц оказываются в равном положении. В состоянии равновесия поровое давление $P_н$ равно нулю. В механике грунтов поровое давление определяется, как избыточный (дополнительный) по сравнению с гидростатическим, напор. Как уже говорилось ранее, при $W < W_н$ расклинивающее давление $P_{раскл}$ отлично от нуля, поскольку порода имеет возможность набухания, и уравновешено внешней нагрузкой.

Рассмотрим более подробно равновесие в связной породе, как при наличии внешней нагрузки, так и в отсутствие последней. Предварительно обратимся к некоторым особенностям капиллярных явлений, в частности к установлению равновесия в различных капиллярных системах. Пусть некоторый объем жидкости находится в коническом капилляре (рис. 3, *а, б*).

В силу различной кривизны менисков, ограничивающих жидкость с обоих концов капилляра, распределение давления в жидкости неравномерно, что вызывает ее перетекание к одному из концов – к узкому, если жидкость смачивает стенки капилляра (рис. 3, *а*) или к широкому – в противном случае (рис. 3, *б*). Для цилиндрического капилляра (рис. 3, *в*) жидкость может находиться в любом месте, так как кривизны обоих менисков одинаковы. В общем случае, когда жидкость находится в капилляре

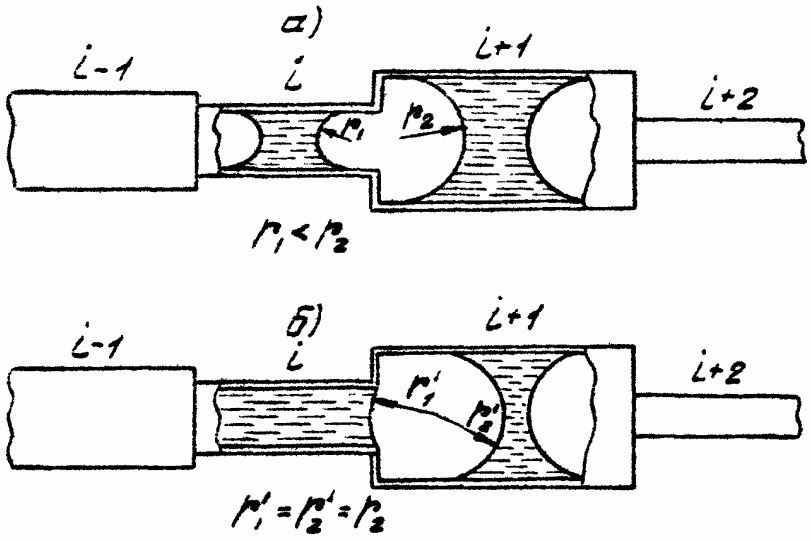

Рис. 4. Жидкость в модельном капилляре: а – положение менисков в первоначальный момент времени; б – положение мениска в состоянии равновесия

сложной геометрической конфигурации (рис. 3, *г*), например, в каком-либо месте пористого тела, кривизны ограничивающих его менисков в состоянии равновесия также будут равными (здесь предполагается, что радиусы кривизны менисков достаточно малы и можно пренебречь изменением давления жидкости в поле тяжести). Рассмотрим теперь модельный капилляр, составленный из элементарных цилиндрических капилляров различного радиуса (рис. 4). Пусть в каждом элементарном капилляре имеется некоторый объем жидкости. Предположим, что давление пара жидкости в газообразной фазе разделяющей объемы жидкости в i-ом и $(i+1)$-ом капиллярах составляет P / P_s. Равновесное давление пара над менисками жидкости в данных капиллярах равно P_i / P_s и P_{i+1} / P_s. Так как $r_i < r_{i+1}$, то $P_i / P_s < P_{i+1} / P_s$, поэтому, если $P_i / P_s < P / P_s < P_{i+1} / P_s$, то очевидно в $(i+1)$-ом капилляре будет происходить испарение жидкости и в i-ом капилляре – ее конденсация.

В состоянии равновесия должно быть

$$\frac{P_i}{P_s} = \frac{P_{i+1}}{P_s} = \frac{P}{P_s},$$

т.е. кривизны менисков становятся одинаковыми (рис. 4, *б*) и равными кривизне мениска в большем капилляре. Разумеется, то же самое справедливо и для капилляров любой формы. Таким образом, как для отдельного мениска, так и для капиллярно-разобщенной жидкости состояние равновесия характеризуется равенством кривизны всех менисков, имеющихся в системе. Известно, что связные породы характеризуются наличием пор, размеры которых варьируют в широких пределах. В наиболее тонких порах могут быть реализованы мениски со значительной средней кривизной. Причем в изотропных породах распределение пор по размерам одинаково в любом сечении. С учетом вышесказан-

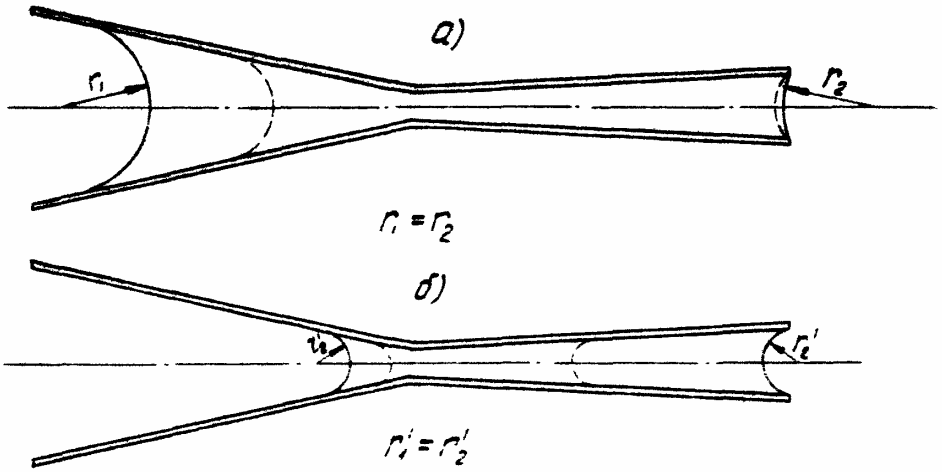

Рис. 5. Испарение жидкости из сообщающихся конических капилляров: а – равновесные положения менисков в первоначальный момент времени; б - равновесные положения менисков в момент начала движения второго мениска

ного можно утверждать, что кривизны всех менисков в образце породы в состоянии равновесия одинаковы.

Рассмотрим изменение кривизны менисков по мере уменьшения влажности породы (например, в процессе ее высушивания). Предварительно, для наглядности, вновь обратимся к модельному капилляру (рис. 5), составленному из двух конических капилляров с различными углами при вершине. Пусть в начальный момент времени кривизны менисков одинаковы ($r_1 = r_2$), причем мениск в узком капилляре находится на его конце. При уменьшении объема жидкости начинает двигаться только мениск в широком капилляре (положение мениска в процессе испарения показано на рисунке 5 пунктирной линией). Мениск на конце узкого капилляра изменяет свою кривизну соответствующим образом, однако он не продвигается вглубь капилляра. Движение первого мениска продолжается до тех пор, пока его кривизна и соответственно кривизна второго мениска не станет равной некоторой величине (r_1', рис. 5, *б*), при которой угол, образуемый вторым мениском с поверхностью капилляра будет равным краевому углу смачивания данной жидкости. После этого начинает двигаться вглубь капилляра, также и второй мениск. В течение всего процесса уменьшения объема жикости происходит непрерывное возрастание кривизны менисков, т.е. уменьшение их радиусов кривизны. В принципе аналогичное явление наблюдается при уменьшении влажности связных пород, когда мениски втягиваются в наиболее тонкие поры с одновременным увеличением их кривизны. В зависимости от влажности породы жидкость может находиться в местах контакта частиц, полностью заполнять некоторый микрообъем породы, заполнять весь объем породы. Так как обычно поровая жидкость смачивает твердую фазу породы (его частицы), то естественно мениски обращены вогнутостью внутрь жидкости, т.е. уменьшают давление в ней по сравнению с давлением окружающей газообразной

среды. Отсюда возникает так называемое капиллярное поджатие частиц или капиллярная связность грунтов. Если некоторый малый объем (V_0) связной породы подвести к свободной поверхности смачивающей жидкости, то последняя начнет впитываться в породу, вызывая ее набухание. Процесс набухания продолжается до тех пор, пока влажность породы не станет равной влажности набухания ($W_н$), а ее объем – равным определенной для данных условий величине $-V_н$. Если прервать процесс набухания, отделив породу от поверхности жидкости, в некоторый момент, когда ее объем имел значение $V_t < V_н$, то увеличение объема породы прекратится не сразу, а по достижении объема V_t', причем $V_t < V_t' < V_н$. Это говорит о том, что при отделении породы от поверхности жидкости, в ней появились силы, препятствующие ее набуханию. Такими силами могут быть только капиллярные силы. Действительно, пока порода находилась в контакте с жидкостью, кривизны менисков были равны кривизне свободной плоской поверхности, т.е. нулю и следовательно, капиллярные силы не проявились. После отрыва за счет перетекания жидкости в более тонкие поры и установления одинакового давления в ней, мениски приобрели определенную равную кривизну, обусловив капиллярные силы соответствующей величины. Кроме того, увеличение объема на величину $\Delta V = V_t' - V_t$ в результате некоторого набухания после отделения породы от жидкости привело к дополнительному увеличению кривизны менисков, одновременному уменьшению сил отталкивания и в конечном итоге – к установлению равновесия.

Подытоживая сказанное здесь и ранее, отметим особенности равновесия в связных породах:

1) во влажной связной породе действуют силы отталкивания, определяющие его набухание и силы притяжения, обусловливающие их связность;

2) силы отталкивания связаны с перекрытием граничных фаз и диффузных ионных оболочек вокруг частиц;

3) силы притяжения представляют собой вандерваальсовое взаимодействие в случае, если частицы одинаковой природы и капиллярные силы;

4) молекулярные силы притяжения в сотни раз слабее капиллярных;

5) силы отталкивания уменьшаются при увеличении зазора между частицами в процессе набухания породы и практически равны нулю при влажности набухания $W_н$;

6) капиллярные силы зависят от влажности породы в силу того, что

кривизна менисков определяется объемом жидкости – с увеличением влажности величина этих сил снижается;

7) в случае отсутствия внешней нагрузки равновесие связной породы определяется соотношением

$$F_{отт} - F_{прит} = 0 . \qquad (5)$$

Если пренебречь молекулярными силами, то выражение (5) перепишется в виде

$$F_{отт} - F_к = 0 ,$$

где $F_к$ - удельная величина капиллярных сил.

Разлагая $F_к$ на две составляющие, имеем:

$$F_{отт} - F_к' - F_к'' = 0 , \qquad (6)$$

где $F_к' = -P_к \cdot \frac{S_з}{S_с}$ - удельная составляющая капиллярных сил, связанная с капиллярным давлением; $P_к = P_ж - P_г$ - капиллярное давление (перепад давле-

ний в поровой жидкости ($P_ж$) и газообразной фазе ($P_г$), окружающей мениски); $S_з$ - площадь сечения, занятая жидкой фазой (площадь заполнения); $S_с$ - общая площадь сечения; $F'' = \frac{\sigma L_з}{S_с} \cdot \sin(\pi - \tau)$ - удельная составляющая капиллярных сил, связанная с действием поверхностного натяжения жидкости по периметру смачивания; $L_з$ - периметр площади заполнения; $\pi - \tau$ - угол, образуемый поверхностью мениска с данным сечением.

В общем случае, при наличии внешнего давления P получим следующее условие равновесия:

$$P_{раскл} + P_к K_s - \sigma K_L \sin(\pi - \tau) = P, \qquad (7)$$

где $K_s = \frac{S_з}{S_с}$; $K_L = \frac{L_з}{S_с}$; $P_{раскл} = P_{отт}$.

Таким образом, условие равнове-сия связной породы по К. Терцаги – Н.Я. Денисову, лежащее в основе механики грунтов, а также по Л.И. Кульчицкому недостаточно точно отражает специфику данных пород;

8) обменные катионы, образованные в результате поверхностной диссоциации глинистых частиц удерживаются вблизи последних, образуя диффузный гидратно-ионный слой;

9) в общем случае, если поровый раствор представляет собой, в отличие от диализованной породы, электролит, то распределение ионов в системе «глинистая частица – поровый раствор» по современным представлениям [9, 10] подчиняется мембранному или доннановскому равновесию.

Изложенное в пунктах 1–9, позволило нам разработать физико-хими-ческую модель элементарной ячейки связной породы, представленную на рисунке 6.

Модель состоит из двух жестко скрепленных между собой сосудов, один из которых *3* помещается частично в другой *4*. Внутренний сосуд *3* отделен от внешнего полупроницаемой перегородкой (мембраной) 6, способной пропускать анионы и катионы внешнего электролита и молекулы воды, и удерживающей обменные катионы *2* в сосуде *3*. Равновесие между растворами внутреннего и внешнего сосудов будет соответствовать доннановскому равновесию. Раствор в сосуде *3* ограничен со стороны, противоположной мембране *6,* поршнем *1*, через который передается внешнее давление P. На дне внутреннего сосуда (на поверхности мембраны) находится пружина *5* небольшой длины и значительной жесткости, предназначенная для моделирования расклинивающего давления при перекрытии граничных фаз. Внешний сосуд *4* имеет на конце систему конических капилляров *7* с различными углами при вершине, моделирующую систему капиллярных менисков в элементарной ячейке породы. Поровый раствор проникает из сосуда *4* в капилляры, образуя систему менисков *8*. Состояние равновесия данной модели описывается соотношением (7). Суммарный объем жидкости в модели соответствует содержанию влаги в связной породе (влажности W).

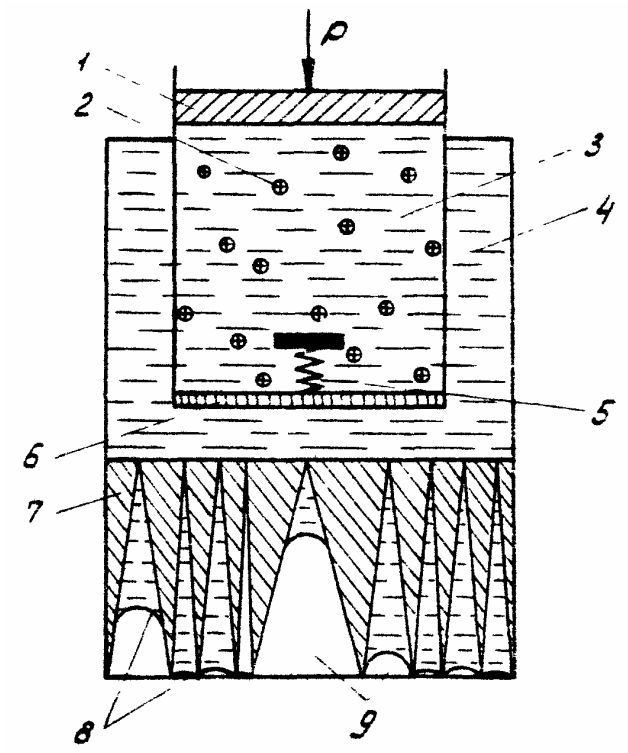

Рис. 6. Физико–химическая модель связной породы: *1* – поршень для передачи внешнего давления; *2* – обменные катионы; *3* – внутренний сосуд, моделирующий ионный слой частиц; *4* – внешний сосуд с электролитом; *5* – пружина; *6* – полупроницаемая перегородка (мембрана); *7* – система капилляров; *8* – мениски; *9* - газ

Рассмотрим поведение модели в зависимости от объема жидкости в сосудах, т.е. от влажности породы. Для простоты положим $P = 0$. При содержании в модели количества жидкости, соответствующего $W_н$, расклинивающее давление $P_{раскл}$ равно нулю (порода максимально набухшая). Тогда согласно (2.6) капиллярные силы также равны нулю, что говорит о нулевой кривизне менисков. По мере уменьшения объема жидкости (при $W < W_н$) максимально развитые диффузные слои частиц перекрываются, появляются силы отталкивания ($P_{раскл} > 0$) и равновесное состояние обеспечивается действием капиллярных сил, связанных с искривлением поверхности менисков. При достаточном снижении влажности начинается перекрытие граничных фаз частиц – поршень достигает пружины и начинает сжимать ее. С появлением второй составляющей раскливающего давления, равновесие возможно при еще большем искривлении менисков, определяющих значительный перепад давлений в жидкости и во внешней среде (в жидкости создается значительное отрицательное давление – поровое давление $P_ж$).

Аналогично можно рассмотреть поведение модели и при $P > 0$. При этом следует учесть, что величина P для ячеек, находящихся внутри объема породы, представляет собой давление со стороны соседних ячеек. Предполагается, что элементарная ячейка есть некоторый микрообъем породы, включающий по меньшей мере две взаимодействующие между собой частицы. В дальнейшем данная модель будет рассматриваться и как модель всего макрообъема породы, поскольку свойства макрообразца и ее выделенного микрообъема породы, идентичны. При необходимости, связная порода может быть рассмотрена также в виде совокупности большого числа соединенных между собой моделей ячейки.

1. *Terzaghi K.* Erdbaumechanik, 1925. 325 s.

2. *Денисов Н.Я., Жукова В.М.* Поровое давление и сопротивление сдвигу глинистых пород. В кн: Информационные материалы №3 к совещанию по устойчив. сооруж. при незаверш. консолид. глинистых пород их основания. М.: 1957, с. 17–31.

3. *Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е.* Теоретические основы механики грунтов и их практические применения. – М.: Стройиздат, т. 1, 1959, т. 11, 1961. 357 с.

4. *Флорин В.А.* Основы механики грунтов. – М.-Л.: Стройиздат, т. 1, 1959, т. 11, 1961. 357 с.

5. *Терцаги К.* Теория механики грунтов. – М.: Госстройиздат, 1961, 507 с.

6. *Цытович Н.А.* Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. 280 с.

7. *Bishop A.W., Henkel D.J.* The Measurment of Soil Properties in The Triaxial Test. London, 1957.

8. *Кульчицкий Л.И.* Роль воды в формировании свойств глинистых грунтов. – М.: Недра, 1975. 212 с.

9. *Маттсон С.* Почвенные коллоиды. – М.: Сельхозгиз, 1938. 432 с.

10. *Сергеев Е.М., Злочевская Р.И., Дивисилова В.И., Алексеенко А.П.* Современные представления о механизме взаимодействия воды с глинами в процессе их набухания. В сб.: Труды Междунар. симпозиума. Инженерно-геологические свойства глинистых пород и процессы в них. Вып.1. М.: 1972, с. 101-117.

ГИАБ

Коротко об авторах

Дугарцыренов Аркадий Владимирович – докторант кафедры «Физика горных пород и процессов», Московский государственный горный университет.

Статья представлена кафедрой «Физика горных пород и процессов» Московского государственного горного университета.
Рецензент – *Гридин Олег Михайлович,* доктор технических наук, профессор, кафедра «Физика горных пород и процессов», Московский государственный горный уни-верситет.