

Р.Э.ДАШКО, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, regda2002@mail.ru*
А.В.ШИДЛОВСКАЯ, *канд. геол.-минерал. наук, доцент, shidanna@bk.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

R.E.DASHKO, *Dr. in geol. & min. sc., professor, regda2002@mail.ru*
A.V.SHIDLOVSKAYA, *PhD. in geol. & min. sc., associate professor, shidanna@bk.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint-Petersburg

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ПРИРОДА НАБУХАНИЯ И ОСМОТИЧЕСКОЙ УСАДКИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД В ОСНОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проанализировано влияние физико-химических и химических факторов на особенности протекания процесса набухания и осмотической усадки глинистых пород при условии отсутствия мембранного эффекта. Показано, что при разных соотношениях концентраций поровой воды глинистых пород (C_n) и фильтрующихся растворов (C_ϕ) природа набухания за счет подтока воды в породу и ее оттока существенно различна. Приведены балансовые уравнения для пяти типов набухания. По результатам экспериментальных исследований получена формула для расчета концентрации растворов (порог осмотической усадки $C_{\text{пou}}$), превышение которой приводит к развитию осмотической усадки глинистых пород. Выполнено заключение о тенденции изменения прочности и деформационной способности пород при набухании и усадке.

Ключевые слова: глинистые породы, мембранный эффект, концентрации растворов, законы диффузии, порог осмотической усадки, набухание, давление набухания, адсорбция, прочность, деформационная способность.

PHYSICAL AND CHEMICAL GENESIS OF SWELL AND OSMOTIC SHRINKAGE OF CLAY SOILS IN CONSTRUCTION'S BASE BY RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCHES

The effect of physical-chemical and chemical factors on peculiarities of swell and osmotic shrinkage of clay provided to unmembrane's effect is analyzed. It is demonstrate that the genesis of swell due to water inflow in soil and its outflow is principally different and depends on different correlation of clay pore water concentration (C_n) and solutions filter-passing (C_ϕ). The balance equations for five types of swells are adduced. The experimental researches are allowed to obtain the equation for calculation of solution concentration (boundary of osmotic shrinkage C_{pou}). The exceeding of C_{pou} leads to osmotic shrinkage of clay formation. The conclusion of strength and deformation capacity of clay by swell and shrinkage is gained.

Key words: clay soils, membrane's effect, concentrate of solution, law of diffusion, boundary of osmotic shrinkage, swell, swell pressure, adsorption, strength, deformation capacity.

Анализ работы многих промышленных предприятий показывает, что некоторые сооружения даже в первые годы эксплуатации испытывают дополнительную неравномерную осадку. Кроме того, наблюдаются случаи подъема отдельных несущих

конструкций и сооружений в целом, что объясняется изменением гидрогеологической обстановки и температурного режима в основании сооружений и приводит к негативному преобразованию состава, состояния и свойств глинистых пород.

При рассмотрении проблемы физико-химического взаимодействия промышленных стоков с глинистыми грунтами одним из важных вопросов является исследование механизма их проникновения в грунтовую толщу. Утечки производственных вод из цехов предприятий, растворонесущих коммуникаций обычно происходят под действием ничтожно малых градиентов напора, в то же время из шламо- и хвостохранилищ, гидрозолоотвалов, очистных сооружений, различных накопителей жидких отходов производства наблюдается фильтрация в толщу пород при градиентах напора, достигающих нескольких единиц. Вместе с тем необходимо учитывать особенности строения толщи пород оснований и, прежде всего, наличие или отсутствие в них трещиноватости.

Степень раскрытия трещин и размер блока определяют режим движения жидкой фазы в толще грунтов. Раскрытие трещин более 1,5 мм предполагает быстрое опускание стоков до глубины, где глинистые грунты обладают достаточно низкой водопроницаемостью. С течением времени наблюдается постепенный подъем уровня грунтовых вод, который будет интенсифицировать физико-химические и биохимические преобразования дисперсных блоков при их взаимодействии с промышленными стоками.

При раскрытии трещин от 0,5 до 1,5 мм движение стоков замедляется, что сказывается на характере их взаимодействия с глинистыми грунтами. При этом возникает возможность значительного преобразования грунтов уже на начальном этапе проникновения загрязненных вод в толщу основания. В этих двух случаях следует рассматривать преимущественно конвективное движение стоков в трещиноватой толще грунтов.

Уменьшение раскрытия трещин ниже 0,5 мм приводит к резкому уменьшению скорости движения утечек. Конвективный характер движения еще более замедляется, а интенсивность преобразования глинистых грунтов под действием жидких агрессивных сред возрастает.

Дальнейшие уменьшения размера трещин до значений, сопоставимых с разме-

рами пор, определяет значительное влияние поверхностных явлений на характер движения стоков. В этом случае следует анализировать глинистую толщу как среду, обладающую тонкой пористостью. Такая же модель должна рассматриваться применительно к глинистым грунтам, в которых отсутствует трещиноватость. Рассмотрение и анализ модели глинистых грунтов основания как среды, обладающей только тонкой пористостью, предполагает необходимость сравнительной оценки действующего градиента напора I_d с начальным градиентом фильтрации I_n . Если $I_d < I_n$, проникновение стоков будет происходить диффузионным путем за счет градиента концентраций стоков и поровых вод глинистых грунтов. При коэффициентах фильтрации глинистых грунтов менее 10^{-5} м/сут и $I_d > I_n$ скорости конвективного и диффузионного движения стоков становятся сопоставимыми и механизм их перемещения следует рассматривать как диффузионно-конвективный.

Для решения инженерно-геологических и геоэкологических задач с целью прогноза изменения свойств глинистых грунтов и обоснования длительной устойчивости сооружений необходимо исследование взаимодействия компонентов промышленных стоков с грунтами.

Осмотические и диффузионные процессы в глинистых грунтах. Особенности взаимодействия техногенных растворов с глинистыми породами следует рассматривать на основе анализа двух типов моделей строения толщи: при наличии и отсутствии трещиноватости в рассматриваемых отложениях. В данном случае рассматриваются только трещиновато-блочные среды, к которым могут быть отнесены глинистые породы средней и малой степени литификации.

Заполнение трещин более минерализованными растворами по сравнению с поровыми водами глинистых грунтов приводит к появлению диффузионно-осмотических процессов за счет градиента концентраций. На глинистые грунты неравномерно распространять эффекты, наблюдаемые на мембранах, и рассматривать протекающие процессы без мембранного эффекта. Как

отмечает академик С.И.Смирнов: «...все экспериментальные и натурные наблюдения показывают, что в толщах глин и в достаточно больших экспериментальных образцах имеет место обычная диффузия растворителя (осмос) при одновременно идущей в противоположном направлении диффузии растворенного вещества. Эффект мембраны здесь отсутствует»*.

При рассмотрении физико-химических взаимодействий с трещиноватой толщей одним из кардинальных вопросов прогноза является возможность набухания либо усадки отдельных блоков глинистых грунтов. Набухание блоков предопределяет постепенное смыкание трещин, изменение несущей способности грунтов. Усадка увеличивает степень раскрытия трещин, что вызывает ослабление толщи и возможность более глубокого проникновения стоков в трещиноватые грунты. Усадка блоков происходит за счет процессов осмотического оттока влаги из них при существовании определенного градиента концентраций между фильтрующимся C_ϕ и поровым C_n растворами при условии, что $C_\phi > C_n$.

Баланс влаги, поступающей в горную породу, складывается из следующих составляющих:

$$Q = Q_{\text{диф}} - Q_{\text{осм}},$$

где $Q_{\text{диф}}$ – количество воды, поступившей вместе с ионами при их диффузии в породу из рассола; $Q_{\text{осм}}$ – количество воды, которое ушло из породы в процессе осмоса.

Равенство $Q_{\text{диф}} = Q_{\text{осм}}$ будет определять отсутствие изменения баланса влагосодержания в глинистой породе. Концентрация раствора при $Q_{\text{диф}} = Q_{\text{осм}}$ отвечает порогу осмотической усадки глинистой породы.

Характер и механизм потока воды в глинистую породу и ее оттока из породы при возрастании градиента концентраций J_k показан на рис. 1.

* Смирнов С.И. Происхождение солености подземных вод седиментационных бассейнов. М.: Наука, 1971. С.210.

Smirnov S.I. The genesis of salinity of underground water of sedimentary basin. Moscow: Nauka, 1971. P.210.

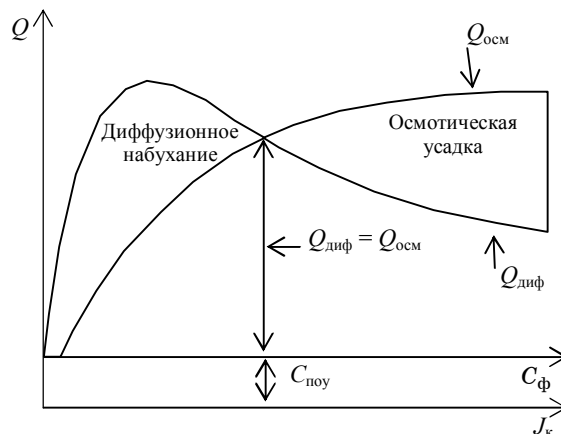


Рис. 1. Характер изменение баланса влаги Q в глинистой породе при одновременном протекании диффузии солей и осмотическом оттоке воды $Q_{\text{осм}}$

Анализ рис.1 показывает, что постепенное выполаживание кривой, отражающей диффузионный процесс привноса воды в породу, а затем ее снижение по мере роста концентрации внешнего раствора, объясняется уменьшением количества воды, поступающей вместе с диффундирующим веществом. С повышением концентрации раствора C_ϕ и ростом градиента концентраций J_k увеличивается осмотический отток воды из глинистой породы. Запаздывание осмотических процессов при небольших концентрациях растворов может быть объяснено значительной структурированностью воды в глинистой породе, когда малые градиенты концентраций недостаточны для оттока молекул растворителя из нее. Следовательно, в этом случае существует начальный градиент осмоса для определенного типа глинистой породы и раствора.

Осмотические явления в глинистых грунтах в теории и практике инженерно-геологических и геоэкологических исследований без учета мембранного эффекта не изучены. При исследовании роли осмотических процессов необходимо установить ту концентрацию фильтрующего раствора, при которой начинается усадка блоков глинистых грунтов. Такая концентрация $C_{\text{пou}}$ названа нами порогом осмотической усадки. При $C_\phi > C_{\text{пou}}$ происходит увеличение раскрытия трещин за счет обезвоживания пород, при $C_\phi \leq C_{\text{пou}}$ наблюдается неизменность либо постепенное закрытие трещин в процессе набухания блоков глинистых пород.

При прогнозе осмотических процессов необходимо учитывать интенсивность их протекания в различных типах глинистых пород в зависимости от исходного физического состояния, гранулометрического и минерального состава. При оценке осмотических процессов следует принимать во внимание напряженное состояние пород. Экспериментальные исследования, проведенные в широком диапазоне изменения концентраций растворов NaCl (от 5 до 300 г/л), в интервале влажности глинистых грунтов от предела раскатывания (W_p) до предела текучести (W_T) показали, что интенсивное развитие осмотического оттока влаги из глинистых блоков наблюдается при влажности $W > 1,2W_p$, что связано с состоянием воды в дисперсных системах. Соответственно в зависимости от влагосодержания грунта изменяется и концентрация растворов (градиент концентрации), выше которой имеет место осмотическое обезвоживание глинистого грунта.

Оценка порога осмотической усадки может быть выполнена по следующей эмпирической формуле для хлоридных натриевых растворов:

$$C_{\text{пou}} = \frac{B\sqrt{M_c}}{W - 1,2W_p},$$

где B – эмпирический коэффициент, зависящий от гранулометрического и минерального состава грунтов, для глин гидрослюдистого состава $B = 14 \div 16$, для суглинков $B = 10 \div 12$; M_c – содержание глинистой фракции в породе, доли единицы; W – начальная влажность глинистой породы при условии ее полного водонасыщения в естественных условиях залегания (до поступления протоктов), доли единицы; W_p – влажность на пределе раскатывания, доли единицы.

Поскольку в глинистых грунтах отсутствует мембранный эффект, наряду с осмотическим оттоком влаги (движение воды в сторону более высоких концентраций) происходит диффузия солей электролитов из минерализованных растворов в блок глинистых грунтов. Постепенное накопление солей в грунте компенсирует в некоторой степени его усадку при осмотическом обез-

воживании. Увеличение содержания солей в блоках глинистых грунтов и осмотический отток влаги приводит к изменению их состояния и свойств, что должно быть учтено при проектировании и эксплуатации сооружений, поскольку эти процессы могут существенно повлиять на прочность и деформационную способность глинистых пород, а также на их водопроницаемость.

Известно, что диффузионный поток вещества всегда направлен в сторону уменьшения концентрации и определяется первым законом Фика:

$$Q_c = -D_m \omega_e \frac{dC}{dl},$$

где Q_c – общий поток вещества; D_m – коэффициент молекулярной диффузии в дисперсной среде, который определяется особенностями ее состава и состояния, а также физико-химическими свойствами растворов; ω_e – расчетное сечение; dC/dl – градиент концентрации.

Первый закон Фика описывает стационарную (установившуюся) диффузию, при которой концентрация диффундирующего вещества в любой точке пространства с течением времени не изменяется. Если концентрация диффузионного вещества изменяется во времени, то этот процесс описывается вторым законом Фика (уравнением нестационарной диффузии):

$$\frac{dC}{dt} = D_m \frac{d^2C}{dl^2},$$

где t – время диффузии; l – координата в направлении диффузии.

Таким образом, при одинаковой температуре движущей силой диффузии в любой фазе, в том числе и жидкой, является разность концентраций. В свободных растворах электролитов коэффициенты молекулярной диффузии солей составляют порядка 10^{-5} см²/с, в то время как в водонасыщенных пористых средах коэффициент диффузии может возрастать до 10^{-6} см²/с. С помощью полевых опытов установлено, что в трещиноватых глинистых породах коэффициент молекулярной диффузии повышается до 10^{-4} м²/сут.

Особенности проявления физико-химической природы набухания глинистых грунтов с учетом диффузионных и осмотических процессов. При концентрации фильтрующих растворов C_{ϕ} , меньших, чем концентрация порога осмотической усадки $C_{\text{поу}}$, наблюдается набухание глинистых пород. Процесс набухания глинистых грунтов при условии существования разности концентраций между внешним C_{ϕ} и поровым растворами $C_{\text{п}}$, а также в зависимости от естественной влажности глинистых грунтов имеет свои характерные особенности.

Диффузионное набухание характерно для глинистых отложений, в которых естественная влажность W_e больше или равна максимальной влажности набухания $W_{\text{наб}}$. Обычно значение $W_{\text{наб}}$ определяется при условии равенства концентрации $C_{\phi} = C_{\text{п}}$. Следует отметить, что влажность $W_{\text{наб}}$ обычно составляет $0,5-0,7W_T$, где W_T – влажность на пределе текучести. Однако, как показывают наблюдения на реальных объектах, при действии достаточно концентрированных растворов отмечается набухание глинистых пород при влажностях, существенно превышающих значение $W_{\text{наб}}$. При $C_{\phi} > C_{\text{п}}$ возможно набухание глинистых грунтов за счет диффузии гидратированных ионов из внешнего раствора в поровое пространство глинистых грунтов при естественной влажности, большей, чем влажность набухания. Характер и степень гидратации ионов зависят от их размеров по отношению к размерам молекулы воды, а также от их валентности. Так, например, диффузия молекулы NaCl в ионной форме определяет передвижение с ней 10 молекул воды (шесть молекул с Na^+ и четыре – с Cl^-), CaCl_2 – 26 молекул, а MgCl_2 – 62 молекул*. При прочих равных условиях интенсивность диффузионного набухания будет возрастать при взаимодействии глинистых грунтов с рас-

творами одно-, двух- и трехвалентных ионов в следующей последовательности: $\text{AlCl}_3 > \text{MgCl}_2 > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl} > \text{LiCl}$.

При сравнительно невысоких концентрациях C_{ϕ} величина диффузионного набухания достигает своего максимума и затем по мере роста концентраций C_{ϕ} начинает уменьшаться (рис.2). Основной причиной такого снижения диффузионного набухания являются осмотические процессы, которые вызывают отток воды из глинистого грунта под действием градиента концентраций. Кроме того, по мере повышения концентрации солей в фильтрующемся растворе начинается образование солей в комплексной форме. Электронейтральность этих соединений определяет отсутствие их гидратированности, а при наличии заряда значительный размер таких молекул снижает их гидратированность. Диффузионное набухание глинистого грунта $\Delta Q_{\text{наб}}^{\text{H}_2\text{O}}$ зависит от количества воды, поступившей вместе с ионами при их диффузии в грунт $\Delta Q_{\text{диф}}^{\text{H}_2\text{O}}$ из внешнего раствора, и количества воды, которое ушло из грунта за счет осмотического оттока $\Delta Q_{\text{осм}}^{\text{H}_2\text{O}} : \Delta Q_{\text{наб}}^{\text{H}_2\text{O}} = \Delta Q_{\text{диф}}^{\text{H}_2\text{O}} - \Delta Q_{\text{осм}}^{\text{H}_2\text{O}}$. Равенство $\Delta Q_{\text{диф}}^{\text{H}_2\text{O}} = \Delta Q_{\text{осм}}^{\text{H}_2\text{O}}$ определяет сохранение баланса влагосодержания в глинистом грунте и соответственно отсутствие деформаций набухания. Концентрация раствора C_{ϕ} в рассматриваемой ситуации будет отвечать $C_{\text{поу}}$.

* Чижик В.И. Изучение микроструктуры растворов электролитов методом ядерной магнитной релаксации: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. 40 с.

Chizik V.I. The analysis of microstructure of electrolytes solutions by the method of nuclear magnetic relaxation: Research Paper...Dr. in phys. and math. Leningrad: State University, 1981. 40 p.

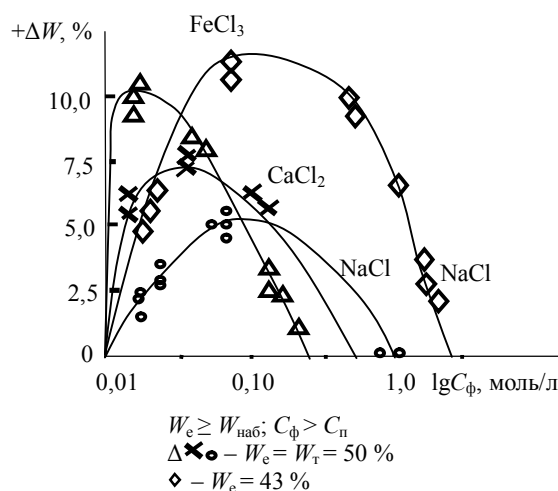


Рис.2. Увеличение влажности ΔW гидрослюдистых глин в процессе диффузионного набухания в растворах различной концентрации C_{ϕ}

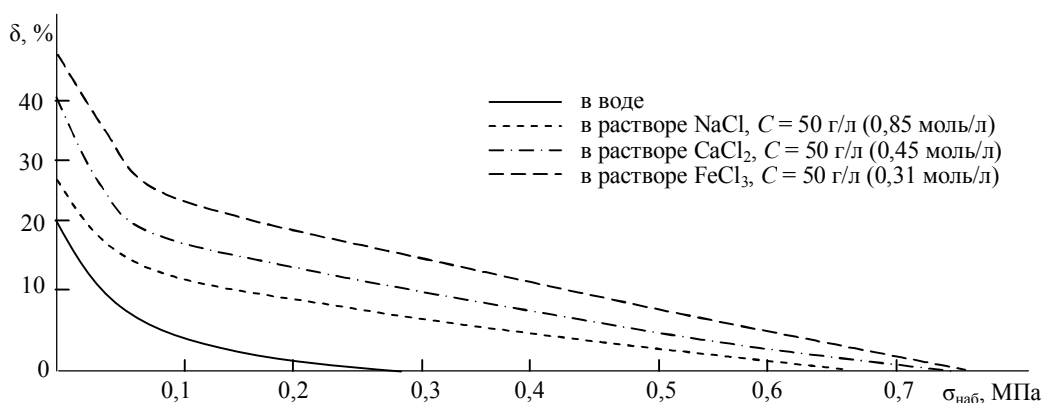


Рис.3. Зависимость между величиной набухания δ и давлением набухания $\sigma_{наб}$ гидрослюдисто-монтмориллонитовых глин в растворах различных электролитов ($W_H \approx W_p$)

Как следует из анализа физической сущности процесса диффузионного набухания, его интенсивность будет определяться, во-первых, составом и концентрацией фильтрующегося раствора и, прежде всего, типом ионов, присутствующих в растворе, во-вторых, влажностью глинистой породы, в-третьих – давлением диффузионного набухания. Диффузионное набухание пород возрастает по мере перехода от растворов, содержащих одновалентные ионы, к двухвалентным, которые являются в наибольшей степени гидратированными. Влияние концентрации раствора на диффузионное набухание неоднозначно: при повышении содержания солей во взаимодействующем растворе от нуля до некоторого определенного значения, зависящего от типа электролита, наблюдается рост набухания, а затем его снижение.

Диффузионно-адсорбционное набухание наблюдается в глинистых грунтах, влажность которых меньше влажности набухания и $C_\phi > C_p$. В этом случае при анализе изменения баланса влаги следует рассмотреть два варианта процесса.

Естественная (начальная) влажность грунтов меньше или равна влажности на пределе пластичности: $W \leq W_p$. При таком влагосодержании осмотический отток влаги из грунта не происходит и количество воды, определяющее интенсивность набухания грунта, зависит от суммарного эффекта ее привноса за счет адсорбционных сил тонкодисперсных частиц $\Delta Q_{адс}^{H_2O}$ и диффузии гидратированных ионов $\Delta Q_{диф}^{H_2O}$: $\Delta Q_{наб}^{H_2O} =$

$= \Delta Q_{диф}^{H_2O} + \Delta Q_{адс}^{H_2O}$ (рис.3). Естественная влажность больше влажности на пределе пластичности ($W > W_p$). В этом варианте следует учитывать возможность оттока воды за счет осмотических процессов $\Delta Q_{осм}^{H_2O}$ и уравнение баланса влаги, поступающей в глинистый грунт и определяющей величину его набухания, имеет вид: $\Delta Q_{наб}^{H_2O} = \Delta Q_{диф}^{H_2O} + \Delta Q_{адс}^{H_2O} - \Delta Q_{осм}^{H_2O}$.

Выполненные экспериментальные исследования по оценке набухания глинистых грунтов в воде и растворах электролитов позволяют оценить величину набухания за счет диффузии гидратированных ионов. Отмечено, что величина свободного набухания в растворах NaCl увеличивается в 1,5 раза, CaCl₂ – почти в 2 раза, а FeCl₃ – более чем в 3 раза. В той же последовательности возрастает давление набухания при взаимодействии глинистых грунтов с растворами различных солей. Максимальная величина свободного набухания и давление набухания зависят от типа электролита, его концентрации и исходной влажности. Чем сильнее электролит, тем при меньшей концентрации наблюдается постепенное снижение величины набухания. Снижение величины и давления набухания при повышении концентрации взаимодействующего с грунтом раствора происходит: 1) за счет уменьшения количества гидратированных ионов и степени их гидратированности при повышении концентрации раствора и снижения уровня диссоциации ионов в растворе; 2) за счет преобразования агрегатного состояния

грунтов, поскольку повышение содержания солей в грунте способствует росту агрегатов. Для раствора $FeCl_3$ агрегирование грунта наблюдается при содержании солей более 0,04 %, $CaCl_2$ – 0,15-0,20 %, а $NaCl$ – 3 %.

Адсорбционное набухание характерно для глинистых пород, влажность которых $W_n < W_{наб}$ и $C_n = C_{\phi}$. Баланс влаги в этом случае соответствует равенству $\Delta Q_{наб}^{H_2O} = \Delta Q_{адс}^{H_2O}$.

Интенсивность и характер адсорбционного набухания глинистых пород определяются многочисленными факторами, главные из которых следующие:

1. Гранулометрический и минеральный состав пород. С ростом содержания тонкодисперсной фракции возрастает давление набухания и скорость этого процесса. Наибольшая интенсивность набухания характерна для глинистых пород группы монтмориллонита, наименьшая – группы каолинита, что связано с размерами частиц, кристаллохимическими особенностями строения решетки глинистых минералов и количеством активных центров на поверхности частиц, определяющим гидрофильность грунта.

2. Состояние глинистой породы по плотности, влажности и степени насыщения. Для водонасыщенных глинистых пород интенсивность набухания уменьшается с ростом влажности и снижением степени плотности. Для глинистых пород Е.А.Сорочаном введено понятие «начальная плотность набухания», оно характеризует начало проявления процесса набухания и не является постоянной величиной, а зависит от сложения породы. Величина свободного набухания и давление набухания породы обратно пропорциональны начальной ее влажности и прямо пропорциональны исходной плотности при полном водонасыщении породы.

3. Характер и тип структурных связей в породе. В глинистых отложениях естественного сложения, для которых характерно наличие связей молекулярной или ионно-электростатической природы, обычно отмечается замедление процесса набухания по сравнению с породами нарушенного сложения при той же влажности. В то же время для сравнительной оценки набухания глинистых пород имеет значение степень их агрегированности, текстурные особенности, состав порового раствора, напряженное со-

стояние пород. По мере развития связей химической природы необходимо учитывать не только их прочность, но и водоустойчивость. Растворение цемента обычно приводит к увеличению величины и давления набухания за счет не только снижения прочности структурных связей, но и повышения концентрации порового раствора, в этом случае возрастает возможность осмотического движения молекул воды в глинистую породу. При наличии водостойких связей химической природы величина и влажность набухания резко уменьшаются.

4. Тектурные особенности глинистых пород. При наличии микрослоистости и соответственно ориентированном расположении глинистых частиц и их агрегатов величина и давление набухания всегда меньше в горизонтальном направлении, чем в вертикальном.

5. Методы определения набухания. Наименьшее набухание отмечается в процессе полевых испытаний, наибольшее – лабораторных исследований. По данным экспериментов Е.А.Сорочана, полевые исследования показывают снижение величины и давления набухания на 40 % по сравнению с результатами лабораторных работ.

Осмотическо-адсорбционное набухание наблюдается при $C_{\phi} < C_n$ и естественной влажности, меньшей, чем влажность набухания. Баланс влаги, поступающей в грунт, будет складываться из следующих составляющих: $\Delta Q_{наб}^{H_2O} = \Delta Q_{адс}^{H_2O} + \Delta Q_{осм}^{H_2O} - \Delta Q_{диф}^{H_2O}$ (рис.4).

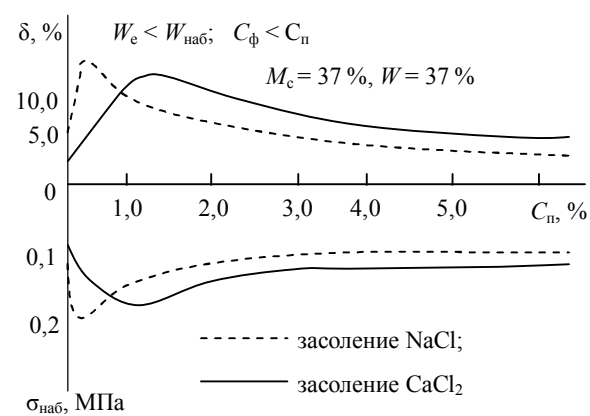


Рис. 4. Изменение величины набухания δ и давления набухания $\sigma_{наб}$ гидрослюдистой глины в зависимости от начального засоления C_n

Влияние набухания различной природы на свойства грунтов

Природа набухания	Характер изменения		Степень литификации глинистых грунтов
	прочности	деформационной способности	
Диффузионная	Зависит от увеличения влажности и изменения степени дисперсности; дополнительный привнос	Зависит от изменения степени агрегированности, повышение которой приводит к росту величины модуля общей деформации	Малая
Диффузионно-адсорбционная	При высоких концентрациях C_f и малой разнице между естественной влажностью и влажностью набухания возможно сохранение постоянства прочности грунта либо даже его увеличение	Зависит от изменения прочности и пластических свойств грунтов. По мере снижения пластичности модуль общей деформации возрастает	Средняя и высокая
Адсорбционная	Определяется водостойкостью и прочностью начальных структурных связей. При наличии неводостойких связей прочность может существенно (на 50-70 %) уменьшаться	Зависит от конечной влажности и изменения характера структурных связей. Во всех случаях наблюдается увеличение деформационной способности пород	« «
Осмотически-адсорбционная	Падение прочности может происходить на 80-90 %	Резкое снижение модуля общей деформации при диффузионном выносе солей из грунта	–
Осмотическая	Уменьшение прочности находится в тесной зависимости от увеличения влажности и степени дисперсности	Снижение модуля общей деформации за счет роста дисперсности и увеличения его пластичности	Малая

Осмотическо-адсорбционное набухание зависит от тех же факторов, которые определяют адсорбционное набухание: гранулометрического и минерального состава глинистой породы, ее плотности и влажности, структурных связей, текстурных элементов, напряженного состояния и т.д.

При рассматриваемом соотношении разности концентрации солей во внешнем и внутреннем (поровом) растворах наблюдается движение молекул воды из внешнего раствора в глинистый грунт (в сторону больших концентраций), которое рассматривается как осмотический привнос влаги ($\Delta Q_{осм}^{H_2O}$). Из глинистого грунта наблюдается диффузия гидратированных ионов ($\Delta Q_{диф}^{H_2O}$). Уменьшение содержания солей в процессе диффузии вызывает диспергацию агрегатов в грунте, повышая его удельную поверхность и, как следствие, адсорбционную способность. Диспергация породы вызывает также усиление взаимосвязи между глинистыми частицами и ионами, вследствие чего диффузионная составляющая потери влаги из породы во времени уменьшается. Диффузия ионов из порового раствора при $C_f < C_n$ будет протекать значительно медленнее, чем диффузия ионов из внешнего раствора в глинистый грунт при условии $C_f > C_n$. Замедление диффузионного выноса гидратированных ионов из глинистого грунта объясняется взаимо-

действием глинистых частиц с ионами. При этом, чем большей агрегирующей способностью будет обладать ион, тем легче будет осуществляться его диффузия из грунта.

Осмотическое набухание возникает, если $C_f < C_n$ и естественная влажность грунта больше влажности набухания. Развитие процесса набухания грунта будет зависеть от осмотического притока воды: $\Delta Q_{наб}^{H_2O} = \Delta Q_{осм}^{H_2O} - \Delta Q_{диф}^{H_2O}$. Одновременно отмечается диффузия гидратированных ионов из грунта, ведущая к уменьшению концентрации порового раствора, что приводит к увеличению степени дисперсности грунта и повышению его адсорбционной способности.

Характер изменения прочности и деформационной способности глинистого грунта в процессе набухания, имеющего различную природу, приведен в таблице.

Данные таблицы позволяют оценить направленность процессов, которые приводят к увеличению степени деформируемости пород, снижению их прочности, а также к развитию деформаций подъема грунтов и сооружений. Как известно, предельно допустимые значения абсолютных деформаций подъема сооружений и относительной осадки составляют 50 % от тех же параметров при проектировании сооружений по второму предельному состоянию (по деформациям).