Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института, том XXIX, вып. 2, 1953 г.

ИЗМЕНЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГЛИН ПРИ УПЛОТНЕНИИ ИХ БОЛЬШИМИ НАГРУЗКАМИ

Доц. В. Д. ЛОМТАДЗЕ

В диагенетических процессах глинистых отложений одним из главнейших является процесс дегидратации разнообразных силикатов и алюмосиликатов, составляющих главную массу их минеральной части. Дегидратация обычно начинается с момента отложения осадков и вызывает изменение не только их физического состояния, но и состава аккумулируемой ими влаги. Параллельно с процессами дегидратации в глинистых отложениях происходят сложные физико-химические изменения слагающих их минеральных образований и цементация осадка. Способность глин к дегидратации определяется их отношением к воде и водным растворам. Согласно современным представлениям, это отношение следует рассматривать как активное физико-химическое взаимодействие между поверхностным раствором или сольватной оболочкой глинистых частиц и внешней средой, содержащей другие растворенные вещества. Считается, что истинная поверхностная растворимость глинистых частиц в воде определяет коллоидную природу глин.

Многочисленные наблюдения показывают, что гидрофильность глин зависит от емкости их поглощения и состава обменных катионов. Емкость же поглощения зависит от минерального состава глин. Следовательно, природа свойств глин определяется минеральным составом и их активным физико-химическим взаимодействием с водой.

Сложный процесс диагенеза глинистых осадков можно подразделить на явления химические, биохимические, коллоидно-химические, физико-механические и др.

Так как в процессе изменения глинистых отложений, особенно на ранних стадиях диагенеза, весьма большую роль играют процессы физико-механические, являющиеся следствием, главным образом, гравитационного уплотнения осадка, изучению именно этого явления и было уделено внимание.

При этом конкретно ставились задачи:

1) исследование влияния минерального состава глин, их структуры, первоначальной влажности и степени минерализации воды на изменение влажности глин при их уплотнении;

2) исследование изменения минерализации воды при ее выжимании из глин.

1. Методика работ

В 1949 г. на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Ленинградского горного института были начаты исследования условий выжимания воды из глин [5]. С этой целью был поставлен первый цикл

предварительных опытов, позволивший опробовать выбранную методику, сделать предварительные выводы и наметить пути для дальнейшего исследования.

При проведении опытов 1950/51 г. была принята методика, наметившаяся в результате работ, выполненных в 1949/50 г., которая, по существу, сводилась к проведению испытаний глин на компрессию, позволивших получить зависимость между влажностью глин и нагрузкой. Для этого был использован компрессионный прибор конструкции П. А. Крюкова [3], при помощи которого испытывались грунты при высоких и сверхвысоких давлениях (рис. 1). Выжимание воды из глин в этом приборе производилось следующим образом.

Из глин с водой приготавливалась грунтовая масса рабочей консистенции, при которой порода не прилипала к посторонним предметам. В таком состоянии глина выдерживалась в эксикаторе в течение 1—2 суток, чтобы в ней равномерно распределилась влажность. Из приготовленной таким образом грунтовой массы вырезался образец цилиндрической формы диаметром 2 *см* и высотой 15—20 *мм*. Образец закладывался в прибор между двумя поршнями. При загрузке

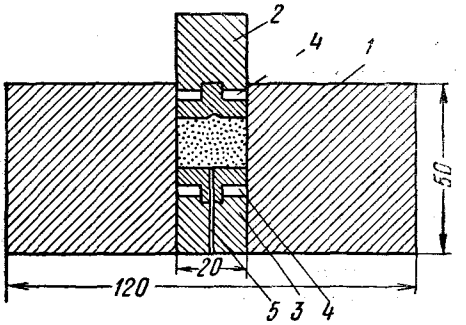


Рис. 1. Компрессионный прибор конструкции П. А. Крюкова:
1 — цилиндр; *2, 3* — поршни; *4* — кожаные сальники; *5* — отверстие в поршнях для воды и нефти

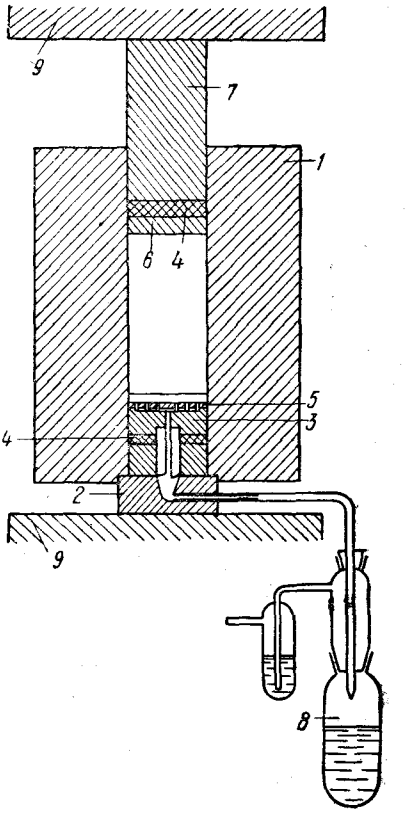


Рис. 2. Компрессионный прибор конструкции П. А. Крюкова:
1 — цилиндр; *2* — подставка; *3* — грибок; *4* — резиновая прокладка; *5* — сетка; *6* — фибровая прокладка; *7* — поршень; *8* — приемник; *9* — площадки гидравлического пресса

прибора грунтом поверх поршней укладывались перфорированные стальные пластинки и влажные листочки фильтровальной бумаги. Одновременно с наполнением прибора испытуемой глиной отбиралась проба для определения ее влажности перед опытом. Прибор в собранном виде устанавливался под пресс. В дальнейшем ход опыта состоял в уплотнении глины ступенями нагрузки и определении ее влажности, соответствующей каждой ступени нагрузки. Уплотнение глин производилось на 60-тонном гидравлическом прессе при нагрузках 60, 150, 500, 1000, 2000, 3000 и 5000 *кг/см*^{2}. Каждая ступень нагрузки давалась постепенно (в течение 24 час.), во избежание продавливания грунта сквозь перфорированную пластинку. Влажность определялась весовым методом после стабилиза-

ции уплотнения глин от каждой ступени нагрузки. Поэтому для каждой ступени закладывался новый образец глины. Для стабилизации уплотнения глины образец выдерживался под прессом не менее одних суток. По полученным данным строились компрессионные кривые.

Для выделения грунтовых растворов из глин в процессе их уплотнения большими нагрузками в 1950/51 г. применялся также прибор, изображенный на рис. 2, конструкции того же автора. Этот прибор позволял выделять и собирать воду отдельными порциями-фракциями в процессе уплотнения глин постепенно увеличивающимися ступенями нагрузки. При этом каждая новая ступень нагрузки на глины давалась после прекращения выделения воды от предыдущей ступени нагрузки.

2. Характеристика глин, выбранных для испытаний

Все экспериментальные работы в 1950/51 г. производились только с тремя разностями глин: ленинградской кембрийской глиной, глуховским каолином и огланлинским бентонитом. Четвертой разностью пород, с которой были выполнены все опыты, являлся чистый кварцевый песок — маршалит. Выбор этих типов пород для опытов определился двумя обстоятельствами: во-первых, образцы этих пород имели достаточные размеры для того, чтобы опыты можно было повторить несколько раз; во-вторых, все эти глины являлись типичными — в минеральном составе каждой из них преобладали определенные глинистые минералы, т. е. они, как и кварцевый песок, в значительной степени являлись мономинеральными.

Переходя к краткой характеристике состава каждой разности пород, остановимся прежде всего на их гранулометрическом составе (табл. 1).

Таблица 1

Наименование пород	Содержание фракций, %				
	0,025—0,05	0,05—0,01	0,01—0,002	0,002—0,001	0,001
Маршалит	15	61	20	1	3
Кембрийская глина .	—	31	28	9	32
Каолин	3	26	25	33	13
Бентонит	—	15	34	16	35

Данные гранулометрического состава пород, подвергнутых испытанию, показывают, что в составе маршалита преобладают пылеватые фракции (0,05—0,002 *мм*), содержание которых достигает 81%; содержание фракций песчаных (0,25—0,05 *мм*) и глинистых (менее 0,002 *мм*) в маршалите ничтожно. Поэтому маршалит по гранулометрическому составу может быть классифицирован как песчаная, слегка глинистая пыль. Удельный вес его, равный 2,65, типичен для кварцевого песка.

Кембрийская глина содержит более 30% глинистых фракций, а пылеватых более 50%, поэтому может быть отнесена к глинам пылеватым. Удельный вес ее равен 2,72.

Каолин и бентонит по содержанию глинистых фракций могут быть отнесены к типичным глинам, в составе которых наблюдается повышенное содержание пыли. Кроме того, в каолине имеется небольшая примесь песка, а в бентоните повышено количество коллоидных частиц. Сравнивая по данным гранулометрического состава степень дисперсности трех выбранных для исследований разностей глин, видим, что они имеют некоторые различия. Характерные влажности глин показаны в табл. 2.

Таблица 2

Наименование пород	Характерные влажности глин, %					
	гигроскопическая	при максимальной гигроскопичности	при максимальной молекулярной влагоемкости	при пределе пластичности	при пределе текучести	число пластичности
Маршалит . .	0,17	0,26	—	—	—	—
Кембрийская глина . . .	0,60	4,86	14,0	19,0	36,0	17,0
Каолин	1,20	2,67	22,0	33,0	43,0	10,0
Бентонит . .	16,50	30,10	44,0	51,0	120,0	69,0

Как видно из таблицы, влажности глин, соответствующие их пределам пластичности, вполне согласуются с их гранулометрическим и минеральным составами.

Рентгеноскопические и термометрические [1] исследования минерального состава маршалита и глин показали следующие результаты.

В составе маршалита, которым, как известно, называют тонкодисперсную разность кварца, содержится до 90—95% кварца и 5—10% какой-то другой кристаллической фазы. Кристаллическая фаза кембрийской глины на 70% состоит из иллита, на 15—20% из каолина и на 10—15% из кварца. Каолин целиком является типичным каолинитом и В. И. Михеев подчеркивает, что качество снимка получилось хорошее, линии минералов четкие и тонкие, т. е. каолин не сильно дисперсен.

Кристаллическая фаза бентонита состоит приблизительно из 40—50% монтмориллонита и 50—60% кристобалита. В литературе подобная смесь обычно носит название бентонита.

Следовательно, для испытаний были выбраны действительно наиболее типичные разности горных пород. Маршалит представляет собой чистый кварцевый песок, который, как известно, является невлагоемким, быстро, но слабо сжимаемым. Каолин состоит нацело из каолинита, являющегося наименее гидрофильным по сравнению с другими глинистыми минералами. Он имеет более устойчивую кристаллическую решетку, мало набухает и менее сжимаем. Бентонит в значительной своей части состоит из монтмориллонита, являющегося представителем второй группы (из известных трех) глинистых минералов. Он наиболее гидрофилен (по сравнению с другими глинистыми минералами), имеет менее устойчивую кристаллическую решетку, сильно набухает и значительно сжимаем.

В составе кембрийской глины решающую роль играет иллит, содержание которого достигает 70%. Иллит входит в состав третьей группы глинистых минералов, свойства которых имеют промежуточные значения между свойствами каолинитовой и монтмориллонитовой групп минералов.

Результаты определения [2] емкости поглощения глин и состава обменных катионов показаны в табл. 3.

Физико-химические свойства глин вполне согласуются с их минералогическим составом. Бентонит, как существенно монтмориллонитовая

[1] Рентгеноскопические и термометрические исследования глин, выбранных для экспериментов, выполнены руководителями соответствующих лабораторий Горного института — доцентами В. И. Михеевым и В. Д. Никитиным.

[2] Определения сделаны химиком Е. Мухиной.

Таблица 3

Наименование пород	Состав обменных катионов					Емкость поглощения, *мг/экв*
	Na	Ca		Mg		
	мг/экв	*мг/экв*	%	*мг/экв*	%	
Маршалит	1,79	9,63	0,192	0,94	0,011	12,36
Кембрийская глина . .	0,83	7,12	0,142	4,41	0,0152	12,36
Каолин	0,60	16,73	0,334	7,39	0,088	24,72
Бентонит	5,49	46,55	0,931	23,64	0,283	75,68

глина, имеет очень высокую, свойственную для таких глин, емкость поглощения. Он должен обладать большой гидрофильностью и чувствительностью к изменению внешних условий. Повышенное содержание натрия в бентоните увеличивает его глинистость.

Каолинит по величине емкости поглощения в физико-химическом отношении должен обладать средней гидрофильностью. Кембрийская глина и маршалит соответственно обладают малой гидрофильностью. Преобладание в обменном комплексе всех разностей глин Са позволяет отнести их к Са-глинам. Таким образом, кембрийская глина, каолин и бентонит являются Са-глинами, имеют некоторые различия по степени дисперсности, но главным образом различаются по своему минеральному составу и, соответственно, по емкости поглощения.

3. Результаты исследований изменения влажности глин при уплотнении

Для выяснения изменения влажности глин при уплотнении в 1950/51 г. было выполнено 155 опытов, не считая значительного количества опытов, проделанных предварительно, с целью установления времени консолидации уплотнения глин, способа загрузки приборов и др.

Влияние минерального состава глин на условия выжимания из них воды

Как было отмечено выше, все опыты по выжиманию воды из глин производились с тремя типичными разностями глин, отличающимися преимущественно своим минеральным составом: бетонит — преимущественно монтмориллонитовая глина, каолин почти нацело состоит из каолинита и кембрийская глина — иллитовая. Четвертой породой, подвергшейся всем опытам, был маршалит.

Результаты первой группы опытов с этими разностями пород изображены на рис. 3 и сведены в табл. 4.

Результаты второй группы опытов, проведенных с теми же разностями пород и при тех же условиях, показаны на рис. 4 и в табл. 5.

Как видно из приведенных данных, результаты первой и второй групп опытов вполне согласуются и наглядно показывают влияние минерального состава глин на условия выжимания из них воды. Чтобы глины различного минерального состава привести, примерно, к одному рабочему состоянию, необходимо увлажнить их различным количеством влаги. Бентонит (монтмориллонитовая глина) приобретет рабочую консистенцию при влажности 66—68%, каолин (каолинитовая глина) и кембрийская глина (иллитовая) — при 41—42 и 29%. Гидрофильность маршалита в этом отношении меньше, чем у других разностей глин.

Таблица 4

Нагрузка, *кг/см²*	Влажность, %			
	маршалит	кембрийская глина	каолин	бентонит
0	27,1	29,0	41,7	66,5
60	20,9	14,7	22,3	40,6
150	20,1	11,9	18,3	37,5
500	15,7	8,8	8,1	32,7
1000	14,2	7,0	7,8	31,9
3000	11,4	6,9	7,5	30,5
5000	—	3,8	4,4	—
Отжато воды при нагрузке 3000 *кг/см²*, %	57,7	76,3	82,0	54,3
Отжато воды при нагрузке 5000 *кг/см²*, %	—	87,0	89,6	—

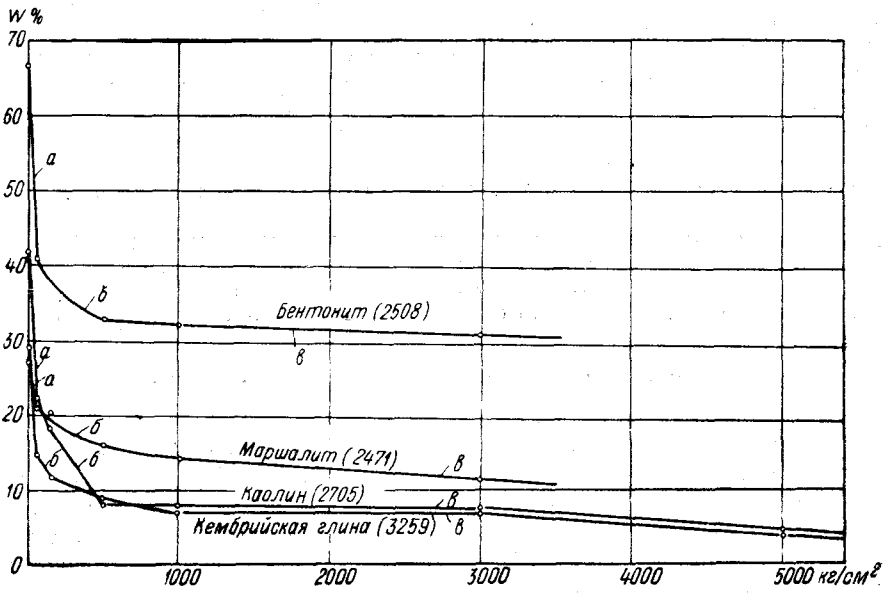


Рис. 3. Кривые, характеризующие изменение влажности глин при уплотнении нагрузками до 3000—5000 *кг/см²* (первая группа опытов)

Таблица 5

Нагрузка, *кг/см²*	Влажность, %			
	маршалит	кембрийская глина	каолин	бентонит
0	26,2	29,3	41,1	68,4
60	20,9	14,6	22,2	40,5
150	19,7	11,6	18,4	36,1
500	15,9	7,4	10,2	27,8
1000	14,1	6,7	8,5	27,2
3000	11,4	5,3	4,4	21,2
Отжато воды, %	57,0	84,4	82,0	69,0

Влияние минерального состава глин существенно сказывается и на эффекте выжимания из них воды. Кембрийская глина при увеличении уплотняющей нагрузки до 3000 *кг/см²* изменяет влажность от 29,0—29,3 до 5,3—6,9% и в среднем теряет влаги 76,3—84,4%. При уплотнении кембрийской глины нагрузкой 5000 *кг/см²* она теряет 87,0% влаги. Каолин при нагрузках до 3000 *кг/см²* изменяет влажность от 41,1—41,7 до 4,4—7,5% и в среднем теряет влаги 82,0%. При нагрузках 5000 *кг/см²* каолин сравнительно легко отдает 89,6% влаги. Бентонит, наоборот, значительно прочнее удерживает влагу и при увеличении нагрузки до 3000 *кг/см²* изменяет влажность всего на 69,0%. Маршалит содержит влаги по сравнению с глинами меньше и, так как является мало сжимаемым, отдает влаги незначительное количество.

Из приведенных данных нетрудно заметить, что при уплотнении глин происходит отделение большого количества влаги. Так, например, при нагрузке до 3000 *кг/см²* один кубический метр кембрийской глины может выделить, примерно, 0,37 *м³* воды, соответственно каолин — 0,45 *м³*, бентонит — 0,45 *м³* и маршалит — 0,24 *м³*. Если вспомнить, что влажность глинистых осадков морских и озерных водоемов в начальных стадиях диагенеза достигает 90—100 и более процентов и затем постепенно уменьшается в связи с выжиманием воды гравитационными силами и что глинистые породы составляют 70—80% общего количества осадков стратисферы, то становится понятной роль дегидратации таких осадков в общем процессе формирования подземных вод.

Различные глины, уплотненные одной и той же нагрузкой в течение одного и того же времени, имели различные конечные влажности. Как правило, высокая влажность сохраняется у бентонита и значительно более низкая у кембрийской глины и каолина.

Согласно существующим, твердо установленным представлениям, отделение воды из глин возможно до максимальной молекулярной их влагаемкости, т. е. влажности породы, «соответствующей максимальной толщине пленки» молекулярной воды, облекающей частицы породы. При меньшей влажности в глинах остается преимущественно пленочная вода, прочно связанная с частицами породы, не передающая гидростатического напора и не подчиняющаяся силе тяжести [4, 7].

Опыты, проведенные в 1950/51 г., показали, что процесс обезвоживания глин продолжается непрерывно при повышении нагрузки до 3000—5000 *кг/см²*. При этом влажность глин становится меньшей, чем влажность, соответствующая их максимальной молекулярной влагоемкости. Следует обратить внимание на то, что при уплотнении кембрийской глины и каолина нагрузками до 5000 *кг/см²* влажность их оказалась близкой к влажности, соответствующей их максимальной гигроскопичности и даже меньше ее. Все кривые, характеризующие изменение влажности глин по мере увеличения уплотняющего их давления, постепенно асимптотически приближаются к оси абсцисс. Следовательно, все эти опыты не только не подтверждают, но и частично опровергают существующие представления о предельной возможности отделения влаги из глин действием гравитационных сил.

Внешняя нагрузка, воспринимаемая глиной, вызывает ее уплотнение. Если глина насыщена водой, то ее уплотнение возможно при условии выжимания воды из пор. При этом уплотнение происходит до наступления состояния гидростатического равновесия, т. е. такого состояния, когда из грунта будет отжата вся лишняя по отношению к данной нагрузке вода. При гидростатическом состоянии в глинах вся нагрузка воспринимается гидратными-коллоидными оболочками — пленками, которые противодействуют увеличению плотности сложения глин под

действием сжимающих сил и уравновешивают их. По мере уплотнения глин толщина гидратных оболочек постепенно уменьшается. Косвенным показателем изменения толщины гидратных оболочек является изменение влажности глин при их уплотнении.

Рассматривая кривые рис. 3 и 4, видим, что процесс уплотнения глин, повидимому, проходит через ряд стадий: стадию более или менее свободного уплотнения, стадию затрудненного уплотнения и стадию замедленной или полной консолидации. Каждой стадии уплотнения отвечает определенный интервал влажности (на кривых участки *а*, *б* и *в*), устанавливающийся в различное для каждой стадии время, т. е. с раз-

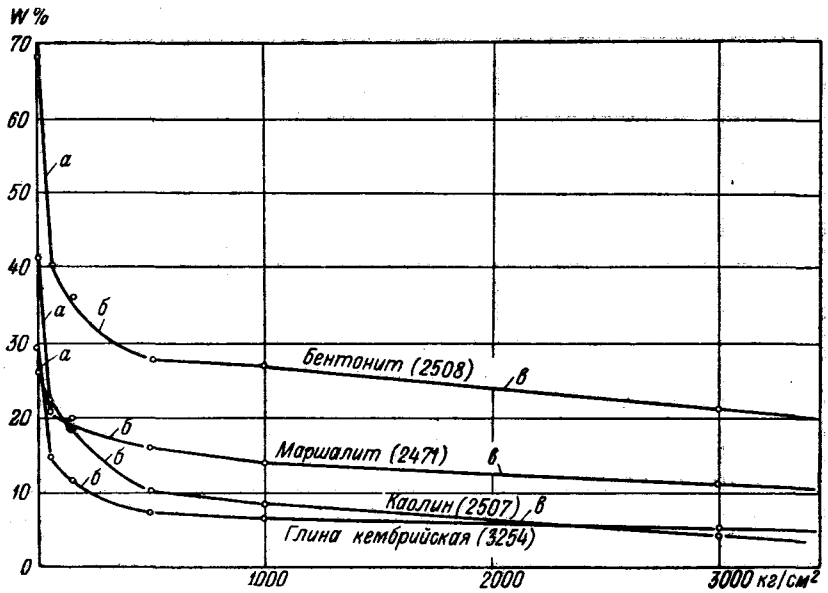


Рис. 4. Кривые, характеризующие изменение влажности глин при уплотнении нагрузками до 3000 *кг/см²* (вторая группа опытов)

личной скоростью. Соответственно названным трем стадиям уплотнения, повидимому, происходит и выделение из глин воды, свободной (легкоподвижной, подвижной), рыхлосвязанной (малоподвижной) и прочносвязанной (трудноподвижной).

Переходы от одной стадии уплотнения к другой постепенные, плавные. Иными они и не могут быть. Величина уплотняющей нагрузки, определяющая ту или иную влажность, есть показатель сил взаимодействия между минеральной частью глин и водой. Так как величина этих сил увеличивается постепенно, по мере уменьшения толщины гидратных оболочек, то и процесс дегидратации глин при уплотнении имеет такой же характер. Несмотря на то, что переход от одной стадии уплотнения к другой плавный, наступает он при нагрузках, измеряемых несколькими десятками килограммов на квадратный сантиметр. Этим нагрузкам соответствует определенная переходная влажность, различная у глин разного минерального состава. В этом отношении наши опыты подтверждают правильность выводов А. Ф. Лебедева о сравнительно легком отделении влаги до определенного предела, именуемого им максимальным смачиванием или максимальной молекулярной влагоемкостью породы. Следует признать, что ранее высказанное нами сомнение [5] о действительном существовании такого показателя водных свойств породы после более детального изучения этого вопроса на новых

материалах отпало. Однако, в отличие от выводов А. Ф. Лебедева, наши опыты устанавливают возможность отделения влаги из глин, имеющих влажность меньше их максимальной молекулярной влагоемкости, действием гравитационных сил. Больше того, наши опыты пока-

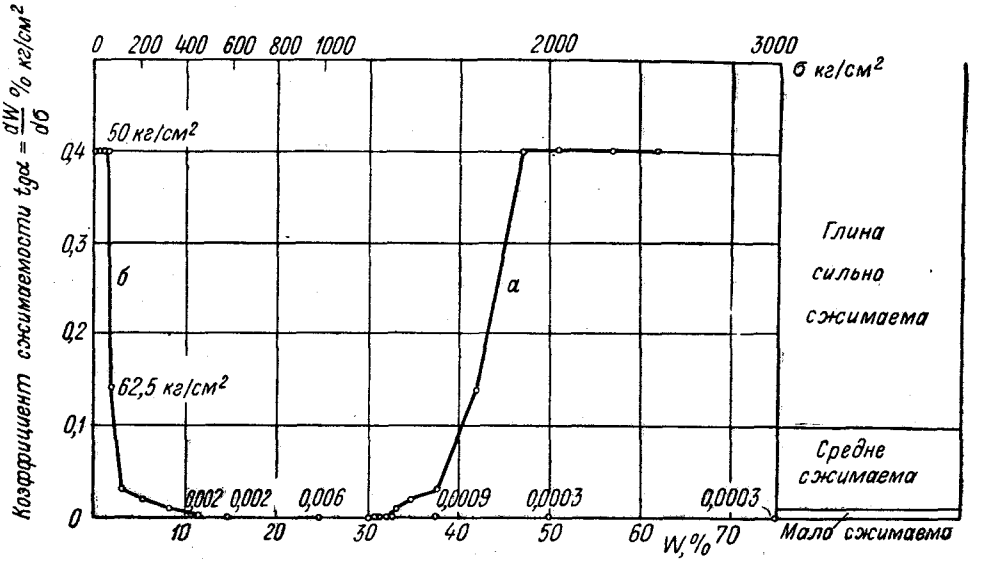


Рис. 5. Кривые, показывающие изменение интенсивности уплотнения бентонита в зависимости от влажности (кривая *а*) и нагрузки (кривая *б*)

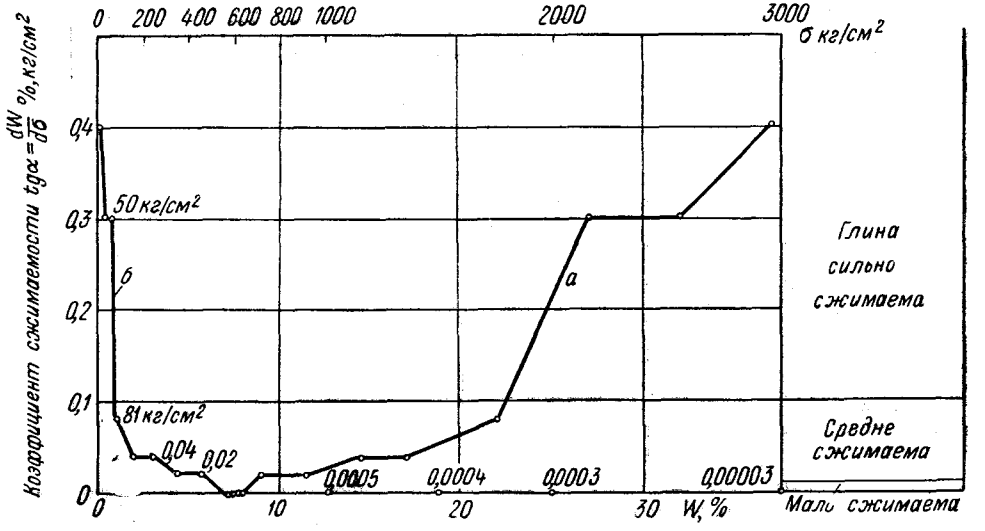


Рис. 6. Кривые, показывающие изменение интенсивности уплотнения каолина в зависимости от влажности (кривая *а*) и нагрузки (кривая *б*)

зывают, что в процессе уплотнения глин и выжимания из них воды вода связанная переходит в воду свободную.

Чтобы нагляднее выявить намечающиеся стадии уплотнения глин, все кривые, изображенные на рис. 3, были дополнительно обработаны методом графического дифференцирования [6] и по полученным данным построены графики (рис. 5—8).

На графике (рис. 5) кривые *а* и *б* показывают изменение величины коэффициента сжимаемости бентонита (угловой коэффициент компрессионной кривой, равный $\operatorname{tg} a = \frac{dw}{d\sigma}$ %/кг/см²) в зависимости от влажности (кривая *а*) и нагрузки (кривая *б*). По кривой *а* видно, что

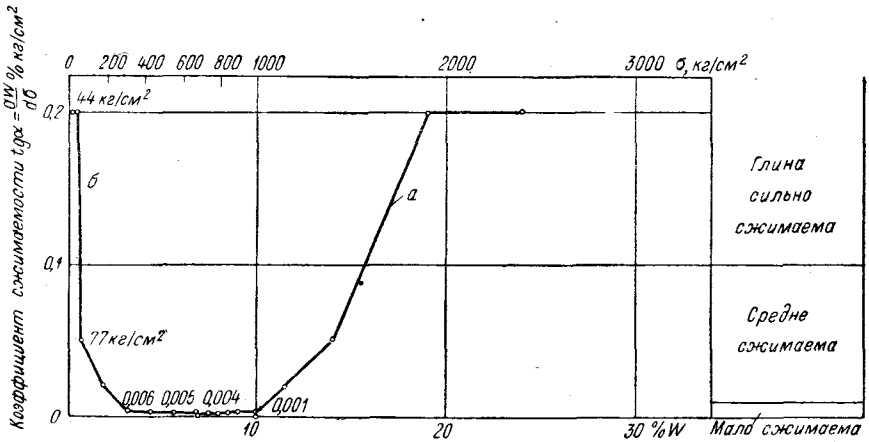


Рис. 7. Кривые, показывающие изменение интенсивности уплотнения кембрийской глины в зависимости от влажности (кривая *а*) и нагрузки (кривая *б*)

уменьшение влажности бентонита до 42,5% происходит быстро, бентонит сжимается сильно и коэффициент сжимаемости его измеряется десятыми долями процента при увеличении давления на 1 *атм*. Макси-

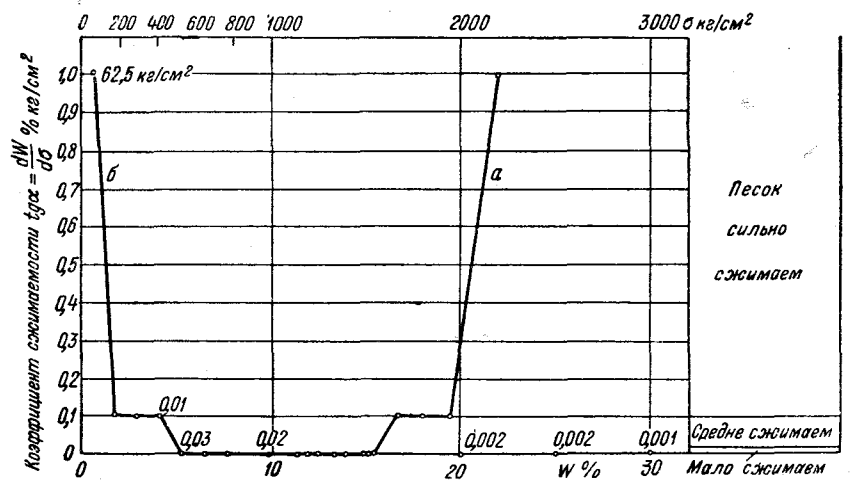


Рис. 8. Кривые, показывающие изменение интенсивности уплотнения маршалита в зависимости от влажности (кривая *а*) и нагрузки (кривая *б*)

мальная молекулярная влагоемкость бентонита, определенная методом влагоемких сред А. Ф. Лебедева, оказалась равной 44%, т. е. практически почти равна характерной влажности, выделяющейся на кривой *а*. По кривой *б* видно, что такой характер уплотнения бентонита происходит при давлениях до 50—60 *атм*. При уменьшении влажности бентонита от 42,5 до 32,5% интенсивность сжатия его заметно снижается, становится неравномерной, «затрудненной» и коэффициент сжимаемости измеряется сотыми долями процента при увеличении давления на 1 *атм*.

Такой характер уплотнения бентонита происходит при давлениях от 50—60 до 500 *атм*. При влажности бентонита меньше 32,5% сжимаемость его приобретет замедленный характер, коэффициент сжимаемости измеряется тысячными и десятитысячными долями процента при увеличении давления на 1 *атм*. Давление при таком уплотнении изменяется от 500 до 3000 *атм*.

На рис. 6—8 показаны кривые изменения интенсивности уплотнения соответственно каолина, кембрийской глины и маршалита в зависимости от изменения влажности и нагрузки.

Первая стадия уплотнения, как видно на этих кривых, происходит при уменьшении влажности каолина до 22%, кембрийской глины до 14% и маршалита до 19,5%. Интересно заметить, что эти влажности точно равны влажностям, соответствующим максимальной молекулярной влагоемкости, определенной методом влагоемких сред.

Характерные влажности устанавливаются у каолина при давлении 50—81 *атм*, у кембрийской глины 44—77 *атм* и у маршалита при давлении больше 60 *атм*.

Вторая стадия уплотнения каолина наступает при изменении влажности от 22 до 8%, у кембрийской глины от 14 до 10%, у маршалита от 19,5 до 15,5%. Интервалы давлений, определяющие такие изменения влажности, соответственно равны от 81 до 580, от 77 до 300 и от 60 до 540 *атм*.

Третья стадия уплотнения у каолина наступает при влажности, меньшей 8%, у кембрийской глины — меньшей 10% и у маршалита — меньшей 15,5%. Давление, определяющее эти влажности, изменяется соответственно от 580, 300 и 540 до 3000 *атм* и выше.

Уплотнение каолина, кембрийской глины и маршалита имеет в значительной степени такой же характер, как уплотнение бентонита. Также выделяются три стадии уплотнения: первая проходит быстро и указывает на сильную сжимаемость глин; интенсивность уплотнения на второй стадии значительно уменьшается и носит неравномерный характер и, наконец, третья стадия имеет явно замедленный характер при очень незначительной сжимаемости глин.

Таким образом, процесс уплотнения — обезвоживания — исследуемых глин и маршалита непрерывен во времени, но стадийный по интенсивности и характеру. Эти характерные особенности изменения уплотнения глин обнаруживаются при постепенном уменьшении их влажности с увеличением давления до 3000 *атм* и более. Если признать, что на первой стадии уплотнения отделяется свободная вода, то максимальную молекулярную влагоемкость (первая характерная переходная влажность на кривых интенсивности уплотнения глин) следует считать мерой (количественным пределом) существенного изменения свойств глинистой породы. Если влажность окажется ниже этого предела, в породе останется связанная вода, качественно существенно отличная от свободной.

На кривой интенсивности уплотнения глин, как отмечено было выше, выделяется и вторая переходная влажность между второй и третьей стадиями уплотнения. Ее следует, повидимому, считать второй мерой. Если влажность окажется ниже этой меры, в породе останется прочносвязанная вода. Следовательно, минимальные силы взаимодействия между прочносвязанной водой и минеральной частью глин достигают величины 300—600 *атм* и постепенно возрастают до 3000 *атм* и выше, по мере уменьшения влажности глин. Минимальные силы взаимодействия между рыхлосвязанной водой и минеральной частью глин достигают, примерно, 40—80 *атм*. Отделение же всей свободной воды из глин осуществляется при значительном избыточном напоре.

Из результатов опытов также видно, что условия выжимания воды из глин в значительной степени зависят от их минерального состава. Минеральный состав существенно влияет на гидрофильность глин, и, наоборот, гидрофильность глин можно рассматривать, как прямой и непосредственный показатель их минерального состава или, точнее, как показатель наличия в глинах группы глинистых минералов, определяющих их водные свойства. Замечено, что при уплотнении каолинитовых и монтмориллонитовых глин нагрузками 1000 *кг/см²* влажность их близка к влажностям каолина или бентонита после уплотнения их той же нагрузкой. Иллитовые глины в этом отношении дают результаты,

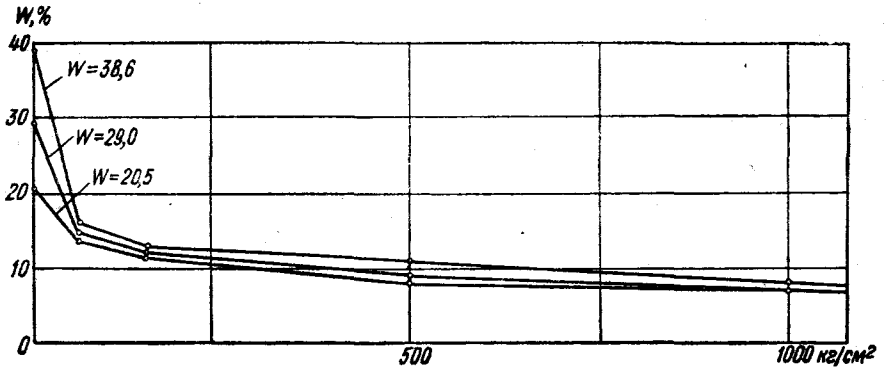


Рис. 9. Кривые, характеризующие изменение влажности кембрийской глины, имеющей различное первоначальное состояние (влажность), при уплотнении нагрузки до 1000 *кг/см²* (третья группа опытов)

близкие к каолину. Отсюда следует, что кривыми, изображенными на рис. 3 и 4, повидимому, можно пользоваться как эталонными для определения наличия преобладающей группы глинистых минералов в глинах.

Влияние первоначальной влажности глин на условия выжимания из них воды

С целью выяснения влияния первоначальной влажности глин (следовательно, и первоначального состояния) на условия выжимания из них воды были поставлены специальные опыты с кембрийской глиной (табл. 6, рис. 9).

Таблица 6

Нагрузка, *кг/см²*	Влажность, %		
	начальная 38,6	начальная 29	начальная 20
0	38,6	29,0	20,5
60	15,8	14,7	13,5
150	12,7	11,9	11,4
500	10,8	8,8	8,0
1000	7,9	7,0	7,0

Как видно из данных, приведенных в табл. 6, влияние первоначальной влажности кембрийской глины при уплотнении ее внешней нагрузкой сказывается только на первой стадии уплотнения. При этом, чем выше первоначальная влажность глины, тем интенсивность ее уплотне-

ния на этой стадии больше. При достижении глиной определенной характерной влажности, равной влажности, соответствующей максимальной молекулярной влагоемкости, интенсивность сжатия заметно изменяется, уменьшается и, по существу, не обнаруживает влияния первоначальной влажности. Для проверки правильности таких выводов опыты были повторены с каолином (табл. 7, рис. 10).

Таблица 7

Нагрузка, *кг/см²*	Влажность, %		
	начальная 48,9	начальная 41,7	начальная 33,0
0	48,9	41,7	33,0
60	25,4	22,3	21,3
150	18,8	18,3	17,1
500	12,5	8,1	11,1
1000	9,3	7,8	8,5
3000	5,7	7,5	5,3

Опыты с каолином подтверждают, что первоначальная влажность глин только на первой стадии влияет на интенсивность их уплотнения. При влажности каолина, меньшей максимальной молекулярной его влагоемкости, интенсивность и характер уплотнения его, так же как и кембрийской глины, не обнаруживает влияния первоначальной влажности.

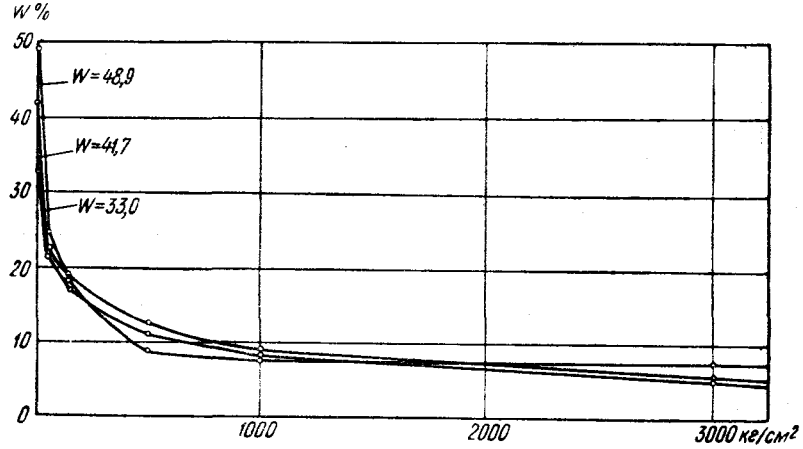


Рис. 10. Кривые, характеризующие изменение влажности каолина, имеющего различное первоначальное состояние (влажность), при уплотнении нагрузки до 3000 *кг/см²* (четвертая группа опытов)

Из приведенного можно сделать вывод о том, что интенсивность уплотнения той или иной глины (глинистой грунтовой массы) определяется, главным образом, содержанием в ней свободной воды. Естественно, эти выводы нельзя распространять на поведение глин, имеющих естественную структуру.

Приведенные данные также подтверждают вывод о том, что глины различного минерального состава обладают различной гидрофильностью и могут содержать определенное, но различное у разных глин, количество связанной воды. Следовательно, по количеству связанной воды в глинах можно примерно судить и о ее минеральном составе, т. е. о содержании группы глинистых минералов, определяющих свойства глин.

Влияние степени минерализации воды на условия выжимания ее из глин

Вода в горных породах, и в том числе вода, заполняющая поры глинистой породы, в естественных условиях представляет собой природный раствор различных соединений. Растворимость их в воде весьма различна. Из наиболее часто встречающихся в природных водах соединений менее растворимыми являются углекислые и сернокислые соли кальция и магния, поэтому они, при прочих равных условиях, быстрее выпадают в осадок, цементируя породу, повышая ее плотность и прочность. Наиболее растворимыми являются хлористые соединения калия и натрия, поэтому они часто образуют водные растворы той или иной степени минерализации.

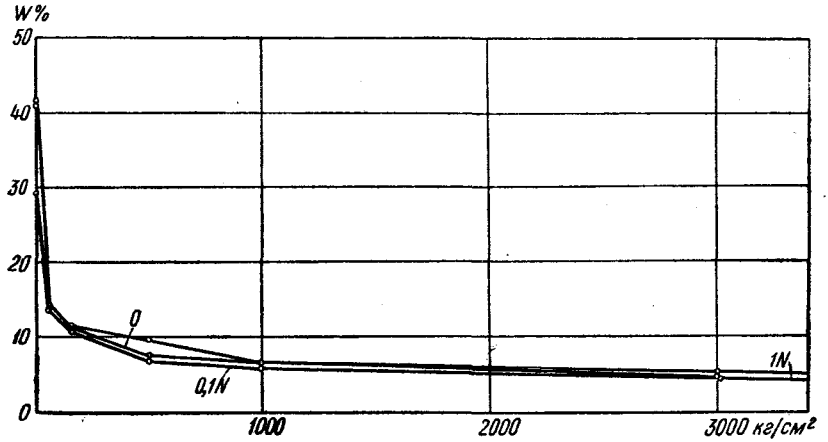


Рис. 11. Кривые, характеризующие влияние степени минерализации воды на условия выжимания ее из кембрийской глины при уплотнении нагрузками до 3000 *кг/см²* (пятая группа опытов)

Для выяснения влияния степени минерализации воды на условия выжимания ее из глин были поставлены опыты с грунтовой массой из кембрийской глины и дистиллированной водой, а также с децинормальным и нормальным растворами поваренной соли (табл. 8, рис. 11).

Таблица 8

Нагрузка, *кг/см²*	Влажность, %		
	кембрийская глина с дистиллированной водой	кембрийская глина с децинормальным раствором NaCl	кембрийская глина с нормальным раствором NaCl
0	29,3	41,5	41,0
60	14,6	13,7	14,4
150	11,6	11,1	11,8
500	7,4	7,2	9,8
1000	6,7	6,2	6,7
3000	5,3	4,7	4,9

Как видно из данных, приведенных в табл. 8 и на рис. 11, минерализация воды на характер и интенсивность выжимания ее из кембрийской глины влияния не оказывает. Для проверки таких данных опыты с кембрийской глиной и каолином (табл. 9, рис. 12) были повторены на большом приборе (табл. 10, рис. 13).

Таблица 9

Нагрузка, кг/см²	Влажность, %		
	кембрийская глина с дистиллированной водой	кембрийская глина с децинормальным раствором NaCl	кембрийская глина с нормальным раствором NaCl
0	40,1	39,8	39,1
60	13,8	14,1	14,3
150	10,8	10,3	11,9
500	8,2	9,0	8,9
1000	6,4	6,8	7,5
2000	5,3	5,1	6,2
3000	4,6	4,5	5,2
5000	3,2	3,6	3,8

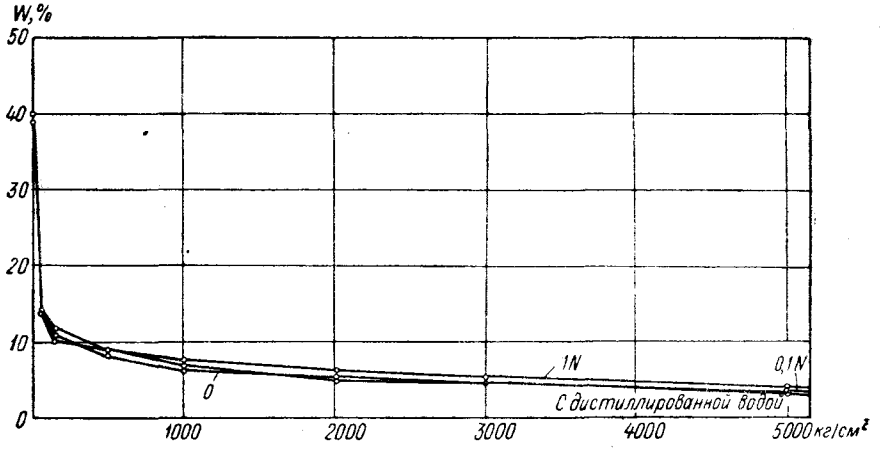


Рис. 12. Кривые, характеризующие влияние степени минерализации воды на условия выжимания ее из кембрийской глины при уплотнении нагрузками до 5000 *кг/см²* (шестая группа опытов)

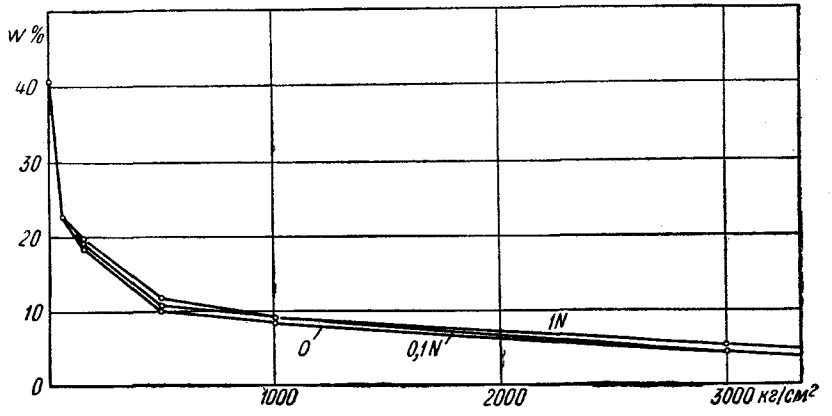


Рис. 13. Кривые, характеризующие влияние степени минерализации воды на условия выжимания ее из каолина при уплотнении нагрузками до 3000 *кг/см²* (седьмая группа опытов)

Таблица 10

Нагрузка, кг/см²	Влажность, %		
	каолин с дистиллированной водой	каолин с децинормальным раствором NaCl	каолин с нормальным раствором NaCl
0	41,1	41,0	40,8
60	22,2	22,6	22,7
150	18,4	19,8	19,2
500	10,2	11,9	10,7
1000	8,5	9,0	9,1
3000	4,4	4,6	5,5

Результаты опытов показали, что минерализация воды не влияет на условия ее выжимания из глин. Все компрессионные кривые, как видно на рис. 12—14, почти сливаются между собой и показывают полное качественное и количественное сходство процесса отжатия воды

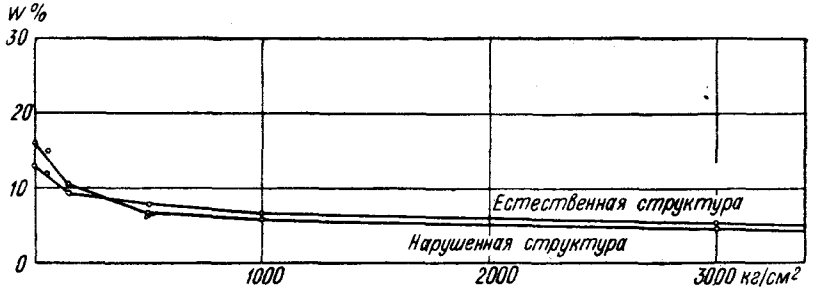


Рис. 14. Кривые, характеризующие влияние структуры кембрийской глины на условия выжимания из нее воды при уплотнении нагрузки до 3000 кг/см²

дистиллированной с водой, в той или иной степени минерализованной (0,1 N и N растворы NaCl). Таким образом, на способность глин удерживать определенное количество связанной воды минерализация влияния не оказывает, влияние же минералогического состава глин при этом выявляется вполне определенно.

Влияние структуры глин на выжимание воды

Общеизвестно, что структура глин влияет на их уплотняемость. Так, например, глины естественной структуры всегда менее сжимаемы, чем те же глины нарушенной структуры.

Для выяснения влияния структуры глин на условия выжимания из них воды был проведен цикл опытов с кембрийской глиной. Испытаниям подвергались образцы глины естественной структуры и влажности, а также образцы глины с нарушенной структурой (перемятая глина), но с влажностью, близкой к естественной (табл. 11, рис. 14).

Кембрийская глина нарушенной структуры, как видно из табл. 11 и рис. 14, уплотнилась несколько больше, чем глина естественной структуры. Следовательно, из глины нарушенной структуры отжато воды несколько больше, чем из глины естественной структуры. Однако существенного и резкого различия в уплотнении глин естественной и нарушенной структур не выявляется, во-первых, потому, что естественная влажность глин низкая, во-вторых, структурные связи глины, по сравнению с величиной приложенной нагрузки, слабые. Отсюда следует вы-

Таблица 11

Нагрузка, *кг/см²*	Влажность, %	
	кембрийская глина естественной структуры	кембрийская глина нарушенной структуры
0	13,1	16,1
60	11,9	14,9
150	9,3	10,4
500	7,8	7,1
1000	6,6	6,0
3000	5,3	4,6

вод, что более заметное влияние структуры глин на условия выжимания из них воды сказывается при сравнительно низких нагрузках, сопзмеримых со структурной прочностью глин, т. е. на начальных стадиях диагенеза глинистых осадков. При высоких нагрузках прочность структурных связей сказывается не настолько значительно, чтобы оказывать сопротивление внешней нагрузке. Поэтому структурные связи в этих случаях быстро нарушаются и уплотнение глины ненарушенной структуры протекает так же, как с обычной нарушенной.

Об изменении степени минерализации воды, выжимаемой из глин

Явления, связанные с условиями выжимания воды из глин, свидетельствуют о том, что при изменении влажности глины изменяются интенсивность и характер ее уплотнения, так как изменяется качество глины. Результаты опытов со всей очевидностью показывают, что в процессе уплотнения глины и, соответственно, выжимания из нее воды изменяются не только свойства самой глины, но и свойства воды, так как связанная вода переходит в свободную. Как известно, связанная вода, в отличие от свободной, обладает большей плотностью, вязкостью, упругостью, сопротивлением сдвигу, замерзает при значительно более низких температурах, обладает очень слабой растворяющей способностью и отличается малой или трудной подвижностью.

Следовательно, в процессе выжимания воды из глин изменяется не только влажность, а совершается переход воды связанной в свободную с существенным изменением ее свойств.

Не имея возможности производить исследования изменений многих свойств воды в процессе ее выжимания из глин, мы произвели наблюдения только за изменением степени ее минерализации. Для этого в процессе непрерывного выжимания воды из кембрийской глины под действием ступенями увеличивающейся нагрузки отжатая вода, в различной степени минерализованная, собиралась в соответствующие приемники (см. рис. 2), затем определялась электропроводность каждой фракции воды.

В табл. 12 приведены данные о количествах отжимаемой в процессе опытов воды.

На первой стадии уплотнения, как видно из таблицы, было отжато сравнительно большое количество воды: 18,77; 8,56 и 17,66 *г*. В результате остаточная влажность глин оказалась соответственно равной 13,8; 14,1 и 14,3%. Она, как известно, соответствует максимальной молекулярной влагоемкости кембрийской глины. Следовательно, наибольшее количество отжатой воды при уплотнении глины нагрузкой 60 *кг/см²* принадлежит к категории свободной. При уплотнении глины следующими ступенями нагрузки отделялась уже связанная вода. Отделение шло в общем небольшими и постепенно уменьшающимися порциями —

Таблица 12

Нагрузка, *кг/см²*	Кембрийская глина					
	с дистиллированной водой		с 0,1N раствором NaCl		с1N раствором NaCl	
	количество отжатой воды, *г*	влажность глины, %	количество отжатой воды, *г*	влажность глины, %	количество отжатой воды, *г*	влажность глины, %
0	—	40,1	—	39,8	—	39,1
60	18,77	13,8	8,56	14,1	17,66	14,3
150	2,16	10,8	6,21	10,3	1,56	11,9
500	1,83	8,2	5,47	9,0	2,21	8,9
1000	1,27	6,4	4,09	6,8	0,94	7,5
2000	0,78	5,3	3,11	5,1	0,91	6,2
3000	0,55	4,6	2,72	4,5	0,74	5,2
5000	1,02	3,2	2,15	3,6	1,03	3,8

фракциями — по мере увеличения ступеней нагрузки (табл. 12). При этом максимальная гигроскопичность кембрийской глины, определенная методом А. В. Николаева, равна 4,86%. Остаточная влажность глины после уплотнения ее нагрузкой 3000 *кг/см²* оказалась равной 4,6; 4,5 и 5,2%, а после уплотнения нагрузкой 5000 *кг/см²* — 3,2; 3,6 и 3,8%. Из сопоставления этих цифр следует, что при уплотнении глины нагрузкой 5000 *кг/см²* из глины начинает отделяться прочносвязанная — гигроскопическая вода.

Как отмечено выше, в процессе непрерывного выжимания воды из глины возрастающими ступенями нагрузки, отжатая вода собиралась отдельными фракциями и определялась ее электропроводность (табл. 13, рис. 15).

Таблица 13

Нагрузка, *кг/см²*	Электропроводность раствора в обратных омах		
	кембрийская глина с дистиллированной водой	кембрийская глина с 0,1N раствором NaCl	кембрийская глина с 1N раствором NaCl
0	—	$1{,}088 \times 10^2$	$8{,}74 \times 10^2$
60	$2{,}67 \times 10^3$	$1{,}372 \times 10^2$	$8{,}17 \times 10^2$
150	$2{,}36 \times 10^3$	$1{,}347 \times 10^2$	$8{,}96 \times 10^2$
500	$2{,}27 \times 10^3$	$1{,}327 \times 10^2$	$9{,}07 \times 10^2$
1000	$2{,}21 \times 10^3$	$1{,}260 \times 10^2$	$9{,}01 \times 10^2$
2000	$2{,}10 \times 10^3$	$1{,}203 \times 10^2$	$8{,}90 \times 10^2$
3000	$1{,}00 \times 10^3$	$1{,}252 \times 10^2$	—
5000	—	$1{,}078 \times 10^2$	$8{,}60 \times 10^2$

Как видно из табл. 13, электропроводность отжимаемой воды постепенно уменьшается в соответствии с уменьшением степени ее минерализации. Эти наблюдения вполне согласуются с существующими представлениями о пониженной растворяющей способности связанной воды. Такое аномальное свойство связанной воды, как известно, выражено тем значительнее, чем более прочно вода связана. В процессе уплотнения глины толщина гидратных оболочек, облекающих минеральные ее частицы, уменьшается, а силы взаимодействия между ними возрастают. Соответственно этому растворяющая способность более тонких слоев связанной

воды должна постепенно уменьшаться, что и показывают наши наблюдения. Полученные данные представляют особый интерес для понимания условий формирования солевого состава подземных вод и, в частности, хлоридно-натриевых рассолов глубинных артезианских бассейнов.

Опыты показывают, что легко растворимые соединения могут находиться в растворенном состоянии очень долгое время в процессе уплотнения глинистых осадков и отжимаются из них под действием увеличивающейся внешней нагрузки.

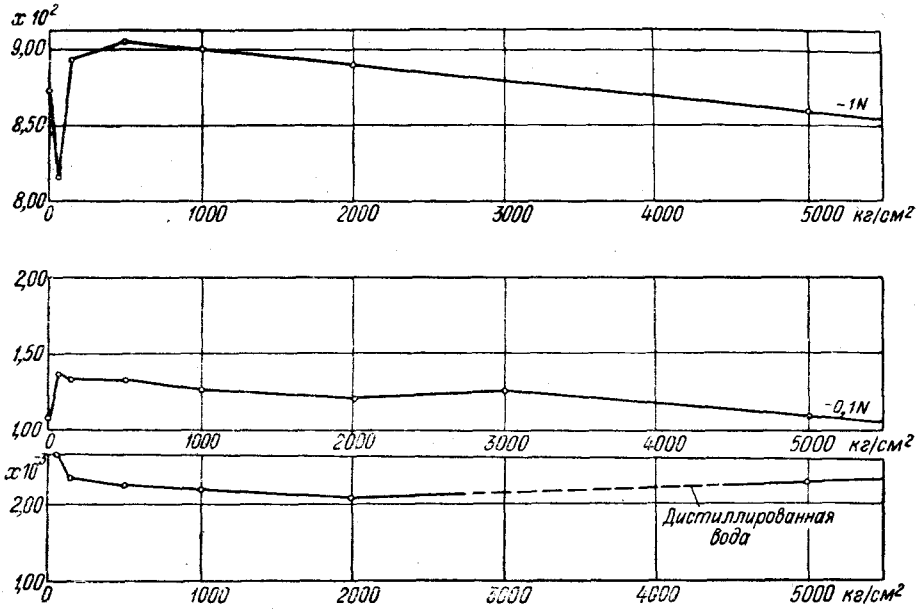


Рис. 15. Кривые, показывающие изменение электропроводности воды, отжимаемой из кембрийской глины

Заключение

1. Особенностями глинистых пород, отличающими их от всех иных отложений, являются минеральный состав и значительные размеры удельной поверхности слагающих их частиц. С этой поверхностью связывается значительное количество влаги, поэтому глинистые породы в обычных условиях стратисферы могут рассматриваться как аккумуляторы влаги.

2. Огромные запасы влаги, аккумулирующиеся в глинистых породах, могут быть в той или иной мере удалены из них лишь при существенном изменении условий их существования, вызываемом увеличением давления или появлением возможности испарения влаги.

3. Проведенные экспериментальные работы показывают, что процесс уплотнения — обезвоживания глин непрерывен во времени, но стадийный по интенсивности и характеру. Эти особенности изменения уплотнения глин продолжаются непрерывно при повышении нагрузки до 3000—5000 *кг/см²*. При этом влажность глин становится меньшей, чем влажность, соответствующая их максимальной молекулярной влагоемкости и даже максимальной гигроскопичности.

4. Кривые, характеризующие изменение влажности глин по мере увеличения уплотняющего их давления до 3000—5000 *кг/см²*, постепенно асимптотически приближаются к оси абсцисс и не подтверждают

существующего представления о предельной возможности отделения влаги из глин действием гравитационных сил и их частично опровергают.

Опыты наглядно показывают, что в процессе уплотнения глин и выжимания из них воды, вода связанная переходит в воду свободную.

5. Кривые уплотнения глин показывают, что процесс уплотнения глин проходит через ряд стадий: 1) более или менее свободного уплотнения; 2) затрудненного уплотнения; 3) замедленной или полной консолидации. Каждой стадии уплотнения отвечает определенный интервал влажности, устанавливающийся в различное для каждой стадии время, т. е. с различной скоростью.

Соответственно названным трем стадиям уплотнения, повидимому, происходит и выделение воды из глин: свободной (легкоподвижной, подвижной), рыхлосвязанной (малоподвижной) и прочносвязанной (трудноподвижной).

6. Если признать, что на первой стадии уплотнения отделяется свободная вода, то максимальную молекулярную влагоемкость (первая характерная переходная влажность на кривых интенсивности уплотнения глин) следует считать мерой (количественным пределом) существенного изменения свойств глинистой породы. При влажности ниже этого предела в породе остается связанная вода, качественно существенно отличная от свободной воды.

На кривой интенсивности уплотнения глин выделяется и вторая переходная влажность между второй и третьей стадиями уплотнения. Эту переходную влажность следует считать второй мерой. При влажности ниже этой меры в породе остается прочносвязанная вода.

7. Величина уплотняющей нагрузки, определяющая ту или иную влажность глин, есть показатель сил взаимодействия между минеральной частью глин и водой. Из результатов опытов следует, что минимальные силы взаимодействия между прочносвязанной водой и минеральной частью глин достигают величины 300—600 *атм* и соответственно постепенно возрастают до 3000 *атм* и выше по мере уменьшения влажности глин. Минимальные силы взаимодействия между рыхлосвязанной водой и минеральной частью глин достигают, примерно, 40—80 *атм*. Отделение свободной воды из глин осуществляется при значительном избыточном напоре.

8. Условия выжимания воды из глин в значительной степени зависят от их минерального состава. Минеральный состав существенно влияет на гидрофильность глин, и, наоборот, гидрофильность глин можно рассматривать, как прямой и непосредственный показатель их минерального состава или, точнее, как показатель наличия в глинах группы глинистых минералов, определяющих их водные свойства.

Кривыми, изображенными на рис. 3 и 4, повидимому, можно пользоваться как эталонными для определения наличия преобладающей группы глинистых минералов в глинах.

9. Интенсивность уплотнения той или иной глины (глинистой грунтовой массы) определяется главным образом содержанием в ней свободной воды, независимо от ее минерализации.

10. На интенсивность уплотнения глин оказывает влияние структура глин. Причем более заметное влияние структуры глин на условия выжимания из них воды сказывается при сравнительно низких нагрузках, соизмеримых со структурной прочностью глин. При высоких нагрузках прочность структурных связей сказывается не настолько значительно, чтобы оказывать сопротивление внешней нагрузке. Поэтому структурные связи в этих случаях быстро нарушаются и уплотнение глины с ненару-

шенной структурой протекает так же, как глины с обычной нарушенной структурой.

11. Рассмотрение явлений, связанных с выяснением условий выжимания воды из глин, приводит к выводу, что при изменении влажности глины изменяются интенсивность и характер ее уплотнения, так как изменяется качество глины. Больше того, результаты опытов со всей очевидностью показывают, что в процессе уплотнения глины и выжимания из нее воды изменяется не только свойство самой глины, но и свойство воды, так как связанная вода переходит в свободную. Результаты экспериментальных работ показывают, что электропроводность отжимаемой воды постепенно уменьшается и позволяет предполагать уменьшение степени ее минерализации. Эти наблюдения вполне согласуются с существующими представлениями о пониженной растворяющей способности связанной воды.

12. Вода в горных породах, и в том числе вода, заполняющая поры глинистой породы, в естественных условиях представляет собой природный раствор различных соединений. Из наиболее часто встречающихся в природных водах соединений менее растворимыми являются углекислые и сернокислые соли кальция и магния, поэтому они, при прочих равных условиях, быстрее выпадают в осадок, цементируя породу, повышая ее плотность и прочность. Наиболее растворимыми являются хлористые соединения калия и натрия, поэтому они часто образуют водные растворы той или иной степени минерализации.

Экспериментальные работы показывают, что при уплотнении глин в процессе их диагенеза могут выделяться огромные количества воды. Причем процесс отделения воды из глин непрерывен, и на последующих его стадиях, естественно, должны отделяться растворы наиболее легко растворимых соединений типа хлоридно-натриево-калиевых.

Эти данные представляют особый интерес для понимания условий формирования солевого состава подземных вод и, в частности, хлоридно-натриевых рассолов глубинных артезианских бассейнов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А. М. Основы современной методики и техники лабораторных определений физических свойств грунтов. Машстройиздат, 1949.
2. Долгов С. И. Исследования подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений. Изд. АН СССР, 1948.
3. Крюков П. А. Методы выделения почвенных растворов. Сборник «Современные методы исследования физико-химических свойств почв», т. IV, вып. 2. Изд. АН СССР, 1947.
4. Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды, изд. 4-е. АН СССР, 1936.
5. Ломтадзе В. Д. Условия выжимания воды и нефти из глин. Записки Ленинградского горного института, т. XXV, вып. II, 1951.
6. Лыков А. В. Теория сушки. Госэнергоиздат, 1950.
7. Приклонский В. А. Грунтоведение, ч. 1. Госгеолиздат, 1949.
8. Попов В. К. Категории воды в почвах и грунтах. Обзор литературы. Научные записки Киевского университета им. Шевченко, т. VII, 1948.
9. Попов И. В. Основы инженерно-геологического грунтования. Госгеолиздат, 1941.
10. Поляков С. С. и Сергеев Е. М. О возможности отжатия связанной воды из грунтов. Ученые записки Московского университета им. М. В. Ломоносова, Грунтоведение, кн. 2, 1951.
11. Шаров В. С. Природа глины и ее отношение к воде и водным растворам. «Гидрогеология и инженерная геология», 1940, № 5.

Поступило 12/XI-1952 г.