Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени Горного института том XXV, выпуск II, 1951 г.

УСЛОВИЯ ВЫЖИМАНИЯ ВОДЫ И НЕФТИ ИЗ ГЛИН

Доц. *В. Д. Ломтадзе*

ВВЕДЕНИЕ

Изучение условий выжимания воды и нефти из глин имеет исключительно важное значение для понимания генезиса нефти, нефтяных месторождений, формирования солевого состава подземных вод и свойств глинистых осадков.

Выжимание воды и нефти из глин связано с вопросом уплотняемости глин. Исследование уплотняемости глин производилось многократно, и этому вопросу посвящена обширная литература. Однако все эти исследования, в большинстве случаев, проводились в инженерно-строительных целях. Поэтому уплотнение глин изучалось, как правило, при небольших нагрузках (4—6 *кг/см*^{2}). Кроме того, эти исследования выполнялись обычно для получения физико-механических характеристик грунта. Исследованию уплотняемости глин при более высоких нагрузках посвящены единичные работы.

Осадки морских и континентальных бассейнов, переходя в стратисферу, постепенно, под давлением вышележащих толщ, теряют содержащиеся в них растворы. В пределах стратисферы давление, испытываемое породами, достигает 1000—2500 *кг/см*^{2}. Согласно существующим твердо установленным представлениям, отделение воды из глин возможно до максимальной молекулярной их влагоемкости; при меньшей влажности в глинах остается преимущественно пленочная вода, прочно связанная с частицами породы, не передающая гидростатического напора и не подчиняющаяся силе тяжести. Удаление такой воды из породы возможно только высушиванием.

Одним из методов определения величины максимальной молекулярной влагоемкости, как известно, является метод влагоемких сред А. Ф. Лебедева, по которому производится прессование породы при нагрузках 60— 70 *кг/см*^{2}. Исходя из отмеченных предпосылок, выполнение первого цикла опытов производилось при нагрузках до 60—70 *кг/см*^{2} и до 1000 *кг/см*^{2}.

В настоящей статье приведены результаты всех выполненных работ. Первый раздел посвящен обзору некоторых специальных вопросов, имеющих отношение к настоящей теме, и изложен по литературным данным, второй — по результатам проведенных нами исследований.

Работа выполнялась сотрудниками инженерно-геологической лаборатории кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Ленинградского горного института: доцентом В. Д. Ломтадзе и старшими лаборантами Л. И. Истоминой и Е. Л. Заседателевой. Рентгеноскопические и термометрические исследования глин, выбранных для экспериментов, выполнены руководителями соответствующих лабораторий Горного института — доцентами В. И. Михеевым и В. Д. Никитиным.

В процессе выполнения настоящей работы коллектив лаборатории института неоднократно обращался за консультацией к старшему научному сотруднику лаборатории озероведения Академии наук СССР П. А. Крюкову и заведующему лабораторией физики пласта Всесоюзного научно-исследовательского геолого-разведочного института П. П. Екимову.

РАЗДЕЛ I

1. ТЕОРИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Проблема происхождения нефти и нефтяных месторождений является одной из главных в науке о геологии нефти. Большинство геологов передовой советской школы акад. И. М. Губкина, исходя из известных геологических закономерностей в распространении нефти и условий ее залегания, рассматривает нефть как вещество, возникающее в результате преобразования органических остатков, отложившихся в морских бассейнах.

На дне морских открытых бассейнов, связанных с океаном, и внутри континентальных бассейнов происходит накопление органических остатков в рассеянной форме в терригенных химогенных илах. Особенно интенсивное накопление органических веществ обычно происходит в сравнительно мелководных зонах морских бассейнов — в зонах накопления глинистых и илистых осадков. Высокое содержание органических веществ — характерный признак большинства глинистых и илистых осадков. Крупнозернистые отложения — пески, гравий и другие, как правило, бедны органическими остатками.

Органические остатки, находясь в условиях анаэробной среды, претерпевают процесс распада на свои составные части — элементы, из которых главную роль в образовании битумов играют углерод, водород, сера и азот. Одновременно с распадом органических веществ происходит образование разнообразных углеводородных газов, сероводорода, аммиака и пр. В дальнейшем углеводородные соединения, полимеризуясь, образуют смеси жидких углеводородов, представляющих собой разные типы нефти. Процесс распада органических веществ и полимеризация углеводородов происходит физико-химическим путем при участии разнообразных бактерий и катализаторов.

При погружении дна бассейна постепенно происходит захоронение осадков с заключенными в них органическими остатками. Но и на этом этапе продолжается процесс изменения осадков, передвижение и дифференциация жидких и газообразных соединений. По мнению большинства геологов, процессы образования нефти и углеводородных газов происходят в земной коре на сравнительно небольших глубинах — в зоне диагенеза осадков. Однако при этом необходимо иметь в виду, что давление есть основной геологический фактор, благоприятствующий превращению органических веществ. Давление, возникающее и увеличивающееся по мере погружения дна бассейна, ускоряет процесс распада органических веществ, совершающийся при участии бактерий, их ферментов и неорганических катализаторов. Давлением, повидимому, обуловливается выжимание из осадков флюидов, среди которых находятся продукты распада органических веществ, дающие всевозможные виды нефтяных углеводородов.

Таким образом, согласно наиболее распространенным представлениям, происхождение нефти и нефтяных месторождений, имеющих про-

мышленное значение, связано с превращением органических остатков в анаэробной среде в углеводородные соединения, отжимаемые в соответствующие коллекторы в процессе постепенного уплотнения преимущественно глинистых осадков. При этом процесс миграции углеводородных соединений сопровождается также отжиманием больших масс воды, которая, главным образом, и выдавливает жидкие углеводороды. Вот почему изучение условий выжимания воды и нефти из глин представляет определенный интерес для науки о геологии нефти.

2. ОТНОШЕНИЕ ГЛИН К ВОДЕ

Термином «глина» нередко обозначаются породы весьма разнообразные по происхождению и петрографическим признакам. Не менее туманно и неопределенно понятие «глинистая порода», даваемое различными исследователями. Однако вряд ли будет ошибкой сказать, что, несмотря на самые различные толкования, терминами «глина» и «глинистая порода» объединяются, независимо от минералогического или химического состава, все тонкодисперсные минеральные образования, обладающие связностью и пластичностью в природном состоянии или при искусственном увлажнении водой и при высыхании сохраняющие приданную им форму. Из всех известных признаков глин и глинистых пород эти признаки являются единственно устойчивыми и легко визуально устанавливаемыми.

Новейшие исследования показывают, что большинство глин состоит из двух компонентов: 1) осадочных новообразований, возникающих вследствие разложения магматических минералов и большей частью принадлежащих к нескольким группам глинистых минералов, обычно преобладающих в составе глин, и 2) реликтовых (обломочных) неразложившихся, но тонко измельченных первичных минералов, имеющих в составе глин подчиненное значение. Новейшие исследования также показывают, что именно химические продукты разложения магматических минералов, образующих несколько групп глинистых минералов, являются в составе глин руководящими, определяющими их происхождение и свойства.

Таким образом, глины в основной своей массе — тонкодисперсные породы, состоящие преимущественно из глинистых минералов, иногда с небольшой примесью обломочных реликтовых минералов. Они обладают связаностью и пластичностью в природном состоянии или при увлажнении водой, при высыхании сохраняют приданную им форму.

По составу глины можно подразделить на полиминеральные (полимиктовые) и мономинеральные (олигомиктовые). Глины обладают целым рядом свойств, характерных только для них и обусловленных тонкостью гранулометрического и своеобразием минералогического состава и условиями их образования.

К глинистым породам, в более узком понимании этого термина, повидимому, следует относить все породы, сходные в какой-то степени по составу и свойствам с глинами, но отличающиеся от них примесями грубодисперсных частиц (песчаные глины, суглинки, супеси) [1], углекислой извести (глины мергелистые или известковистые, глинистые мергели, мергели), степенью уплотняемости и физико-химической измененности

[1] Суглинки и супеси — термины, определяющие не только соответствующее содержание песка в глинистой породе, но и стратиграфическую принадлежность таких пород к рыхлым образованиям четвертичного возраста.

(аргиллиты, опоки) или текстурными признаками (макропористые лессовидные породы и лессы).

При более широкой региональной характеристике к глинистым породам (отложениям), повидимому, следует относить не только собственно глины, но и сходные с ними по составу и свойствам все другие породы.

Глинистые породы в земной коре имеют сравнительно широкое распространение. Из геохимических подсчетов, произведенных различными исследователями, известно, что глинистые породы составляют 70—80% общего количества осадков стратисферы. Остальные 20—30% приходятся на долю других типов осадочных пород.

В составе отложений всех отделов палеозоя, мезозоя и кайнозоя Русской платформы и Приуралья глинистые отложения играют существенную, а для некоторых отделов и преобладающую роль.

Переходя к физико-химической характеристике глин, учитывая цель и задачи настоящей работы, необходимо остановиться на природе глин и их отношении к воде и водным растворам. Эта необходимость определяется тем обстоятельством, что в геологии и сопредельных с нею дисциплинах до сих пор широко распространена физико-механическая точка зрения, сводящая взаимоотношения между глиной и водой к капиллярным явлениям и трактующая глины как материал, состоящий из дисперсных и инертных частиц.

Так, например, акад. В. Р. Вильямс (Почвоведение, изд. 4, 1938, стр. 112), характеризуя почвенные коллоиды, указывает, что «. . . почвенные коллоиды абсолютно нерастворимы в воде, и гранулы их совершенно химически инертны. Они не входят ни в какие химические взаимоотношения с другими телами».

Проф. Н. П. Песков (Физико-химические основы коллоидной науки, изд. 2, 1934, стр. 29) отмечает, что в качестве «. . . очень существенной. . . » характеристики коллоидной системы является то, что «. . . между дисперсионной средой и веществом коллоида или совсем не существует никакого взаимодействия, или, если оно есть, оно должно быть весьма слабо выражено».

Проф. И. В. Яропольский (Основания и фундаменты, 1948, стр 84—85), давая объяснения связности грунта, указывает: «. . . частицы глины весьма малого размера (менее 0,005 *мм*) и имеют плоскую форму в виде чешуек. Абсолютно сухой порошок из частиц глины является сыпучим телом. Но в природе глина в абсолютно-сухом состоянии существовать не может, так как промежутки между ее частицами представляют капиллярные сосуды, которые всегда наполнены водой». Далее проф. И. В. Яропольский пишет: . . . причиной связности является внутреннее сжатие частиц грунта, как стенок капиллярных сосудов, вызываемое явлением поверхностного натяжения воды».

В отличие от этой механистической точки зрения, ряд советских геологов (Ф. П. Саваренский, И. В. Попов, В. А. Приклонский Н. Я. Денисов и др.), почвоведов (М. М. Филатов. А. Ф. Тюлин, Н. А. Качинский) и физико-химиков (В. С. Шаров, П. А. Ребиндер, А. В. Думанский и др.) в основу понимания взаимодействия между глиной и водой кладут активное физико-химическое взаимоотношение между ними, т. е. рассматривают отношение глины с водной средой как химическое взаимодействие между поверхностным раствором или сольватной оболочкой глинистых частиц и внешней водной средой с содержащимися в ней другими растворенными веществами. Считается, что истинная по-

верхностная растворимость глинистых частиц в воде определяет коллоидную природу глин и их отношение к воде. Минералы, из которых, главным образом, состоят глинистые частицы, являются преимущественно алюмосиликатами, имеющими кристаллическое строение и обладающими ионной кристаллической решеткой.

Согласно современным представлениям, кристаллическая решетка глинистых минералов образована из сочетания определенных структурных элементов, образующих чередующиеся между собой элементарные слои. Структурные элементы образованы из атомов кремния и алюминия следующим образом. Атом кремния, соединенный с четырьмя атомами кислорода, образует кремнево-кислородный тетраэдр. Радиусы атомов кислорода и кремния и расстояния между атомами в тетраэдре такие, что четыре атома кислорода, соприкасаясь друг с другом, оставляют между собой пространство, достаточное для помещения атома кремния. Второй структурный элемент состоит из атома алюминия, с которым связано шесть атомов кислорода. Атомы кислорода окружают снаружи атом алюминия, образуя алюминиево-кислородный октаэдр.

Структурные элементы соединяются друг с другом силами химической валентности или общности электронов в цепочки — слои. Решетка минералов каолинитовой группы, например, состоит из двух типов слоев, чередующихся друг с другом. Один из них состоит из плоских сочленений кремнево-кислородных тетраэдров (SiO_4); причем три из четырех атома кислорода в тетраэдре лежат в плоскости атомов кремния, каждый же четвертый атом кислорода находится над атомом кремния (в направлении оси С), образуя мост, связывающий через кислород нижележащий слой с вышележащим — алюминиевым. Последний, как известно, состоит из алюминиево-кислородных октаэдров. Таким образом, каждые два следующие друг за другом слоя постоянно связаны главной валентностью в один слоистый пакет. В алюминиевых слоях обычно четыре атома кислорода бывают замещены гидроксильными группами, поэтому в этих слоях каждый атом алюминия бывает окружен четырьмя гидроксильными группами и двумя упомянутыми выше атомами кислорода, принадлежащими двум алюминиевым оэктаэдрам.

Схема строения слоистого пакета изображена на рис. 1. На схеме четко видна несимметричность слоистого пакета каолинита, который с одного края ограничен атомом кислорода, с другого — гидроксильной группой ОН. Вследствие этого отдельные пакеты более прочно связаны друг с другом, так как притягиваются друг к другу. Поэтому решетка каолинита более устойчива, прочна, при увлажнении мало набухает и образует более крупные кристаллы.

Структура монтмориллонита в общем очень близка к рассмотренной структуре каолинита. В противоположность каолиниту, отдельные слоистые пакеты монтмориллонита построены симметрично, каждый пакет решетки как бы достроен сверху слоем кремнево-кислородных тетраэдров. Вследствие этого слоистые пакеты обращены друг к другу одинаковыми слоями, состоящими из атомов кислорода, и связь между такими пакетами слабее, чем связь между пакетами, обращенными друг к другу разноименными слоями. Вода при таких условиях легко проникает в решетку, раздвигая ее. Поэтому монтмориллонит обычно сильно набухает, решетка его легко раскалывается, и кристаллы этого минерала никогда не могут достигнуть заметных размеров. В воде же они распадаются на частицы диаметром менее 0,001 *мм*.

Из изложенного выше ясно, что заряды атома, находящиеся внутри кристаллической решетки, должны быть взаимно компенсированы — насыщены. Заряды атомов, расположенных в поверхностных частях решетки, часть своих зарядов компенсируют зарядами атомов, расположенных внутри, а часть зарядов имеют свободных. Эти свободные заряды компенсируются за счет присоединения ионов других элементов,

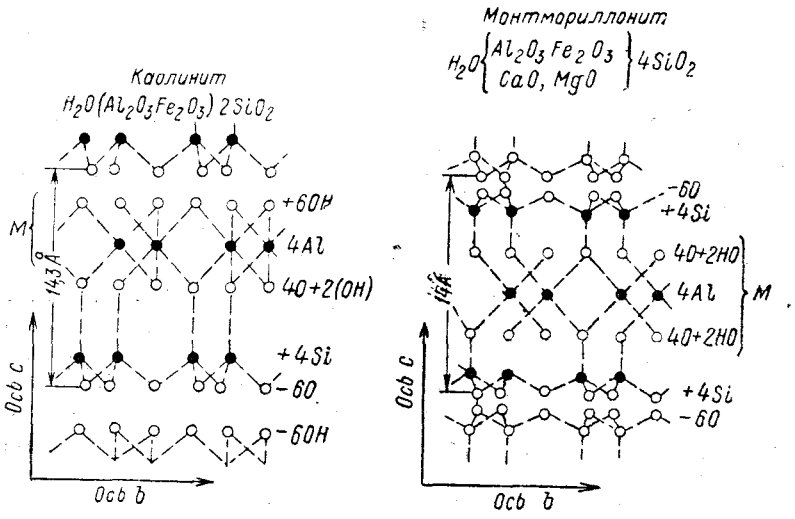


Рис. 1. Структура каолинита и монтмориллонита.

находящихся в окружающей их среде. В водной среде такими ионами, являются главным образом K, Na, Ca, Mg и т. д. Так как добавочные ионы не входят в алюмосиликатное ядро, связь их в кристалле слабее, чем у остальных ионов.

На поверхности частицы ориентация ионов вообще слабее, чем внутри кристалла. В воде связь поверхностных ионов с частицей, вследствие резкого повышения диэлектрической постоянной среды ε, становится гораздо слабее, чем на воздухе. В воде, где $\varepsilon = 81$, притяжение между поверхностными ионами частиц становится в 81 раз слабее, чем у сухой частицы, где средой является воздух с $\varepsilon = 1$. Благодаря этому становится возможной диссоциация поверхностных ионов и возникновение зарядов у коллоидной глинистой частицы. При этом, согласно соответствующим правилам, заряд тела в какой-либо среде зависит от диэлектрических постоянных твердой и жидкой фаз. Твердое тело заряжается положительно, если его диэлектрическая постоянная больше, чем у жидкой среды, и, обратно, заряд твердых частиц будет отрицательным, если диэлектрическая постоянная их меньше, чем у среды. Диэлектрическая постоянная воды всегда во много раз больше, чем диэлектрическая постоянная минеральных частиц; поэтому такие частицы заряжаются отрицательно, образуя сложный анион.

Таким образом, всякая глинистая частица, попадая в водную среду, растворяется — диссоциирует — с образованием сложного аниона и катионов. Между частицами и отдельными катионами возникает электростатическое притяжение. Поэтому отделившиеся катионы располагаются слоем вблизи поверхности частицы. Получается двойной электрический слой, состоящий из отрицательных зарядов на поверхности ча-

стицы и положительно заряженных катионов, располагающихся вблизи нее.

Глинистая частица вместе с ее двойным электрическим слоем называется мицеллой. Наружный слой мицеллы, в котором расположены катионы, называют диффузным слоем, так как концентрация их уменьшается по мере удаления от поверхности частицы. Общее количество ионов, которое глинистая частица может удерживать в диффузном слое и обменивать на другие ионы, называется ее емкостью поглощения.

Как известно, всякий ион, находящийся в водной среде, всегда является возбудителем электрического поля. Поэтому молекулы воды, попадая в сферу действия такого поля, будут деформироваться, превращаясь в ориентированные диполи, и притягиваться к иону. Ионы в водной среде всегда в той или иной степени гидратированы, т. е. окружены ориентированными молекулами воды, образующими так называемую сольватную оболочку. Сольватная оболочка окружает как катионы свободной среды, так и катионы, удерживаемые поверхностью глинистых частиц, расположенных в диффузном слое мицеллы.

В результате этого вокруг всякой глинистой частицы всегда сорбируется вода, привлеченная к частице и удерживаемая у ее поверхности посредством катионов диффузного слоя. У природных глин в качестве катионов сольватного слоя обычно бывают щелочные и щелочно-земельные элементы: Na, K, Ca, Mg.

В глинах морского происхождения и жарких засушливых областей обычно скапливаются растворимые слои щелочных металлов, в сольватном слое преобладает натрий. У глин, отложившихся в пресноводных бассейнах, и глин умеренного пояса, где горные породы хорошо промываются атмосферными и подземными водами, растворимые соли вымываются, и в сольватном растворе преобладает кальций, являющийся главным компонентом пресных вод.

Многочисленные наблюдения показывают, что гидрофильность глин зависит от емкости их поглощения и состава поглощенных катионов. Емкость же поглощения зависит от минералогического состава глин. Как правило, глины монтмориллонитовые более гидрофильны, глины каолинитовые менее гидрофильны. Наличие в диффузном слое глинистых частиц катионов кальция значительно снижает их гидрофильность по сравнению с катионами натрия. Если катионом диффузного слоя является водород, гидрофильность частиц еще более снижается.

Таким образом, природа свойств глин определяется минералогическим составом и их активным физико-химическим взаимодействием с водой. Глинистые частицы в водной среде приобретают заряд, способный притягивать и прочно удерживать вокруг себя водную — сольватную — оболочку. В этой способности обнаруживается существенная сторона водных свойств глин. Именно эта способность определяет основные физические свойства глин и характер взаимоотношений между глиной и водной средой.

При седиментации глинистых осадков в том или ином водном бассейне полного разделения твердой и жидкой фаз не происходит. Часть воды жидкой фазы остается связанной осевшими осадками твердой фазы, которая ее аккумулирует. Накапливание влаги глинистыми осадками происходит главным образом в процессе седиментации осадков, однако определенное количество ее сохраняется и при диагенезе осадков. Если глинистые осадки попадают в зону гипергенеза, вновь происходит усиление аккумуляции влаги.

3. КАТЕГОРИЯ ВОДЫ В ГЛИНАХ

Глинистые отложения в процессе седиментации, как это было показано выше, накапливают влагу. Свежеотложившиеся глинистые осадки на дне водного бассейна обычно образуют сложную и разнородную массу. Попадая в новые условия и имея неустойчивое состояние, они под влиянием гравитационных сил вышеотложившихся осадков и внешних термодинамических и физико-химических факторов претерпевают глубокие и сложные изменения и переходят в горную породу. Совокупность всех этих изменений принято называть диагенезом.

В диагенетических процессах одним из главнейших является процесс дегидратации разнообразных силикатов и алюмосиликатов составляющих главную массу минеральной части глинистых отложений. Дегидратация осадков обычно начинается почти с момента их отложения и вызывает не только изменение их физического состояния, но производит также изменения состава аккумулируемой ими влаги (вода, растворы). Параллельно с процессами дегидратации в глинистых отложениях происходят сложные физико-химические изменения слагающих их минеральных образований и цементация осадка.

Таким образом, процесс диагенеза осадков приводит к сложным изменениям их состояния и состава и, в первую очередь, к дегидратации.

А. Б. Ронов [37], занимаясь изучением вопроса гравитационного уплотнения осадков, пришел к выводу о том, что гравитационное давление вышележащих толщ действует повсеместно и является основным механическим фактором уплотнения осадков в областях спокойного их залегания. Величина уплотнения зависит от состава осадка, размера слагающих его частиц и величины приложенных механических сил.

При механическом уплотнении осадка происходит сближение его частиц, сокращение порового пространства и соответствующее вытеснение частиц, погребенных в порах воды.

Геохимические факторы тоже вызывают уплотнение осадка и уменьшение его пористости. Однако объем порового пространства при этом сокращается не вследствие уменьшения объема пор, а в результате заполнения пор цементирующим веществом или перекристаллизации частиц, слагающих осадок. Перекристаллизация частиц в зоне диагенеза осадка характерна, повидимому, только для карбонатных пород.

Геохимические преобразования осадка повышают прочность и сопротивляемость его механическим усилиям. Взаимодействие механических и химических факторов в процессе диагенеза осадков носит, повидимому, неслучайный характер.

Изучение пористости средне- и верхнепалеозойских толщ Волго-Уральской области, произведенное А. Б. Вистелиусом [11], показало, что пористость пород изменяется ритмически от горизонта к горизонту. Эти выводы указывают на то, что процессы уплотнения осадков также должны иметь в какой-то мере ритмический характер. Интересно заметить, что подтверждением таких выводов может являться также исследование пористых пород кольчугинской свиты Кузбасса, проведенное А. П. Феофиловой [42].

Г. Гедберг [37], занимаясь изучением вопросов гравитационного уплотнения глинистых осадков, пришел к выводу, что этот процесс проходит через ряд следующих стадий (рис. 2).

1. Стадия механической перегруппировки. Доминирующими процессами уплотнения являются изменение «упаковки» частиц еще жидкого

осадка и выжимание воды. Пористость уменьшается от 90 до 75%. Процесс протекает на дне современных морских бассейнов на глубине 5—10 *см* ниже поверхности отложений.

2. Стадия обезвоживания. Господствующим процессом является выжимание адсорбированной воды на контактах между зернами. Заканчиваются процессы удаления свободной воды из больших полостей

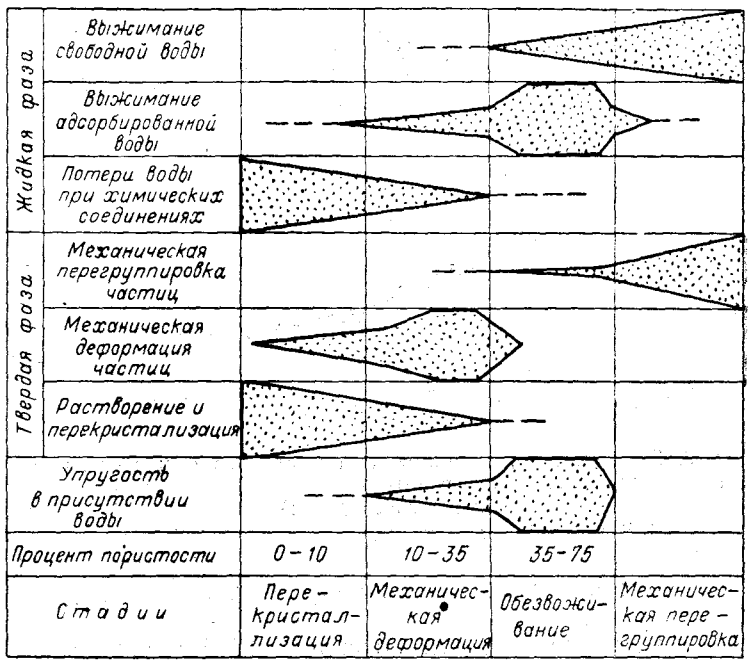


Рис. 2. Стадии и факторы гравитационного уплотнения глин и сланцев

и механическая перегруппировка частиц. Механические частицы еще не соприкасаются непосредственно друг с другом, в связи с чем пластичность системы высока. Пористость изменяется от 75 до 35%. Эта стадия характеризует глубину погребения осадка от нескольких футов до 500 (~160 *м*, участок $A — A$ на рис. 3).

3. Стадия механической деформации. Уменьшение объема происходит вследствие того, что глинистые частицы, вступая в непосредственный контакт друг с другом, начинают деформироваться (изгибание и дробление зерен). Вместе с этим процессом продолжается процесс выжимания адсорбированной воды; начинаются явления перекристаллизации. Пластичность быстро уменьшается. Пористость изменяется от 35 до 10%. Эта стадия охватывает участок $B — B$, представленный на рис. 3, и характеризует глубину погребения от 500 до 6000 футов (~1900 *м*).

4. Стадия перекристаллизации. Рост давления и температуры в условиях уже исчерпанной способности к механической деформации частиц в присутствии незначительных количеств воды, сохранившейся в механически защищенных порах, создают обстановку, в которой дальнейшее уплотнение возможно лишь путем перекристаллизации с образованием более плотных минералов. В этом процессе важную роль играет сохранившаяся вода, значительная часть которой погло-

щается в ходе нового минералообразования. Порода превращается в сланец, а затем в кристаллический сланец. Пористость уменьшается чрезвычайно медленно, несмотря на резко возрастающее давление (участок *C — C* на рис. 3). Теоретически она может в эту стадию изменяться

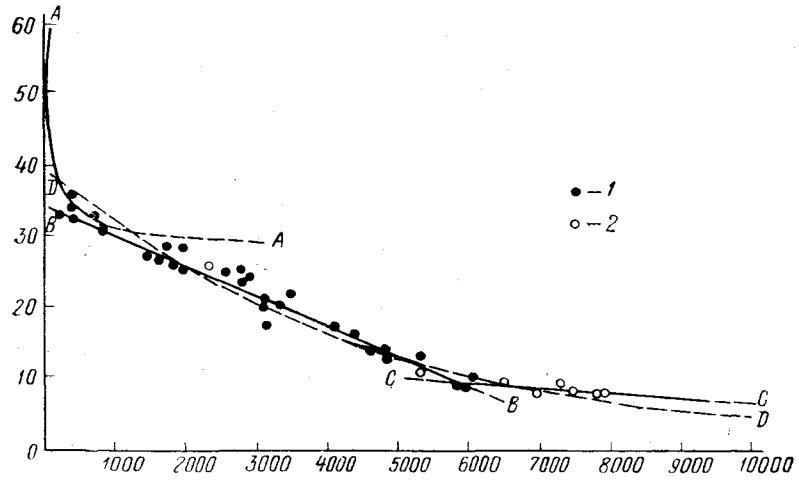


Рис. 3. Зависимость пористости глин и сланцев от величины гравитационного давления (гравитационное давленине в фунтах на квадратный дюйм).
1. Венецуэльские данные. 2. Данные скважины Ренсот

от 10 до 0%, но практически этот предел не достигается даже в филлитах.

Приведенная схема является очень грубой и в некоторой части даже ошибочной (стадия 3—4). Однако она принципиально правильно показывает, что процесс диагенеза протекает в результате постепенных количественных изменений, вызывающих существенные качественные изменения состояния породы.

Чтобы ясно представить себе процесс отделения воды из глинистых отложений, необходимо выяснить, какие формы нахождения в породе она имеет. Достаточно сравнить схемы, выдвигаемые различными авторами, чтобы убедиться в том, что вопрос о различных категориях воды в горных породах, несмотря на большое количество работ, посвященных ему, продолжает оставаться неясным, запутанным. Как известно, первой и наиболее распространенной является схема русского почвоведа А. Ф. Лебедева, основанная на физических свойствах воды.

По схеме А. Ф. Лебедева [31] вода в горных породах в жидком состоянии может находиться в форме гравитационной, пленочной и гигроскопической.

Гравитационная вода заполняет крупные поры и пустоты. Она обладает обычно свойствами жидкой воды, передает гидростатическое давление, передвигается под влиянием силы тяжести. К гравитационной воде А. Ф. Лебедев относил и капиллярную воду, заполняющую капиллярные поры. Капиллярная вода подчиняется как силе тяжести, так и силам поверхностного натяжения, хорошо передает гидростатическое давление. По свойствам она близка к обычной воде.

Пленочная вода образует пленки вокруг частиц породы и удерживается на их поверхности с весьма большой силой. Она не подчиняется

силе тяжести. По свойствам отличается от капельно-жидкой воды тем, что не передает гидростатического давления, замерзает при температуре ниже 0°, лишена способности растворять вещества.

Максимальное количество воды, которое может удерживать порода в виде пленочной, отвечает, по Лебедеву, максимальной молекулярной влагоемкости породы.

Гигроскопическая вода адсорбируется частицами породы из водяных паров и удерживается на поверхности с огромной силой. Когда частицы породы окружены молекулами воды так, что вокруг них образуется сплошная пленка, состояние их влажности будет отвечать максимальной гигроскопичности. Процесс перехода водяного пара в состояние гигроскопической воды сопровождается выделением тепла. Гигроскопическая вода не подчиняется силе тяжести и по свойствам своим значительно отличается от капельно-жидкой воды.

В соответствии с представлениями А. Ф. Лебедева, как уже было отмечено выше, считается твердо установленным, что отделение воды из глин выжиманием возможно только до максимальной молекулярной влагоемкости; при более низкой влажности в глинах остается преимущественно пленочная вода, прочно связанная с частицами породы, не передающая гидростатического давления и не подчиняющаяся силе тяжести. Удаление такой воды из породы возможно только высушиванием.

Таблица 1

Формы нахождения воды в горных породах

по А.Ф. Лебедеву (1916—1918)	по Бюкосу (1917)	по Н. А. Качинскому (1947)	по С. И. Долгову (1948)	по А. М. Васильеву (1948)	по В. П. Попову (1948)
I Гравитационная 1) падающая 2) подвешенная 3) капиллярная II Пленочная III Гигроскопическая	I Свободная II Капиллярная 1) подвешенная 2) четочная 3) ниточная 4) угловая III Молекулярно-связанная, физически мертвая 1) пленочная 2) гигроскопическая	I Свободная II Капиллярная III Рыхлосвязанная IV Прочносвязанная	I Свободная 1) свободная 2) просачивающая 3) капиллярная—легкоподвижная 4) капиллярная—подвижная 5) капиллярная—разобщенная II Сорбированная 1) рыхло-связанная 2) прочносвязанная адсорбированная	I Свободная II Слабосвязанная III Осмотически-впитанная IV Химически сорбированная	I Легкоподвижная 1) свободная 2) связанная II Малоподвижная III Неподвижная 1) пленочная 2) гигроскопическая

Таким образом, исходя из этих представлений, можно было бы считать, что дегидратация глинистых осадков под влиянием гравитационного уплотнения вышележащих осадков возможна только до сте-

пени влажности, отвечающей их максимальной молекулярной влагоемкости. Количественно этот процесс можно выразить через водоотдачу породы, которая равна разнице между полной и максимальной молекулярной влажностью, т. е.

$$B = W_{\text{п}} - W_{m}.$$

Все остальные схемы, приведенные в табл. 1, недостаточно четко согласуются со схемой Лебедева, но, тем не менее, все в какой-то мере отражают ее, принципиально уточняя современными достижениями коллоидной и физической химии. Не останавливаясь на разборе каждой из схем, отметим, что все они, как и личные наблюдения автора, показывают, что в глинистых породах форма нахождения воды будет меняться в зависимости от степени их увлажнения. При этом каждой категории воды будет свойственна определенная подвижность и относительная роль сил, действующих в породе и определяющих ее подвижность. С изменением степени увлажнения породы и, следовательно, с изменением формы нахождения в ней воды меняются и свойства данной породы. Принципиальная схема форм нахождения воды в глинистой породе А. Ф. Лебедева, в соответствии с современным состоянием изученности этого вопроса, представлена в табл. 2.

Таблица 2

Степень влажнения породы	Форма нахождения воды в породе	Подвижность воды	Относительная роль сил, действующих в породе и определяющих подвижность воды	Изменение состояния породы
Значительная	Гравитационная Свободная	Легкоподвижная	Гравитационные	Текучее
	Капиллярная	Подвижная	Капиллярные	
Умеренная	Рыхло-связанная (пленочная)	Малоподвижная		Пластичное
Незначительная	Связанная Прочно-связанная (гигроскопическая)	Практически неподвижная	Поверхностные на границе раздела твердой и жидкой фаз (сорбционные)	Твердое

Из табл. 2 видно, что вода в глинистой породе может находиться в форме свободной и связанной.

Свободная вода в такой породе присутствует при значительном ее увлажнении. Свободная вода, легко подвижная или подвижная, подчиняется, главным образом, силе тяжести и обладает свойствами капельно-жидкой воды.

Свободная вода может быть подразделена на две категории: гравитационную и капиллярную. Гравитационная вода присутствует в породе при чрезмерном ее увлажнении. При нарушении естественного залегания породы, нарушении ее структуры, порода приобретает текучее или даже жидко текучее состояние. Гравитационная вода легкоподвижна и подчиняется, главным образом, гравитационной силе — силе тяжести.

Относительная роль других сил, действующих в породе, ничтожна. Гравитационная вода легко и сравнительно быстро может быть отделена из породы при небольших нагрузках.

Капиллярная вода присутствует в породе при умеренном ее увлажнении. При нарушении естественных условий залегания породы — естественной структуры — порода приобретает пластичное состояние. Капиллярная вода подвижна и подчиняется как силе тяжести, так и капиллярным силам. Гидростатическое давление распространяется по всей массе породы при полном насыщении ее водой. При неполном насыщении глинистой породы водой, капиллярная вода постепенно перетягивается из участков более влажных, где мениски на границе вода — воздух имеют меньшую кривизну, к участкам более сухим, где мениски имеют большую кривизну. Перераспределение влаги при этом процессе происходит также от участков более песчанистых к участкам более глинистым. Относительная роль гравитационных сил при этом становится ничтожной. Движение воды совершается, главным образом, под влиянием капиллярных (менисковых) сил. Отделение капиллярной воды из породы обычно затруднено и протекает медленно. Фильтрация капиллярной воды начинается при напорах, превышающих «предельные».

Связанная вода соответствует незначительному увлажнению породы. Эта вода малоподвижна или неподвижна, она прочно удерживается в породе поверхностными силами, развивающимися на границе раздела твердой и жидкой фаз. Свойства связанной воды отличаются от свойств капельно-жидкой воды.

Связанная вода может иметь две категории — рыхло-связанную и прочно-связанную.

Рыхло-связанная вода располагается в породе в виде пленки на поверхности частиц, слагающих породу, покрывая слоем прочно-связанную воду. Рыхло-связанная вода образуется, повидимому, как за счет вторичной ориентации дипольных молекул воды сверх адсорбированной, воды, так и за счет гидратации в различной степени диссоциированных адсорбированных ионов. Наличие рыхло-связанной воды в породе подтверждается наличием в ней нерастворяющего объема воды, измеряющегося суммарную величину всей сорбированной воды. Рыхло-связанная вода имеет, повидимому, повышенную вязкость. Верхние слои ее удерживаются сорбционными силами, ослабленными, равными давлению менее одной атмосферы, поэтому эти слои могут стягиваться капиллярными — менисковыми — силами и отжиматься из породы очень медленно при высоком давлении.

Прочно-связанная вода образуется путем прочного связывания (адсорбции) молекул воды на поверхности частиц породы с выделением тепла. Адсорбционная вода обволакивает пленкой поверхность частиц породы и, как показывают новейшие работы, пленка эта тем тоньше, чем больше кривизна поверхности частиц, т. е. чем выше дисперсность породы. Адсорбированная вода у поверхности частиц породы закреплена силами огромной величины (давление до 10000 *атм*) и практически является неподвижной. Поэтому такая вода может передвигаться только переходя в пар. Свойства адсорбированной воды, повидимому, отличны от свойств обычной капельно-жидкой воды и, по указаниям некоторых, близки к свойствам твердого тела.

Таким образом, количественные изменения влаги в глинистой породе приводят к существенным качественным изменениям ее свойств, к изменению форм и категорий воды, в ней присутствующей,

к изменению подвижности воды и относительной роли сил, определяющих подвижность воды в породе. Из изложенного также видно, что одни качественные изменения в породе при ее дегидратации развиваются в неразрывной связи с другими качественными изменениями. Ни одно из этих явлений не может быть понято в изолированном виде, вне связи и обусловленности с окружающей средой, без учета динамики их развития.

Важно заметить, что постепенное количественное изменение в породе переходит через определенные для данной породы точки, после которых порода приобретает существенно новые качества. Такими переходными точками являются: предел текучести, предел пластичности, максимальная гигроскопичность, разделяющие текучее, пластичное, полутвердое и твердое состояние породы. Границу перехода породы из полутвердого состояния в твердое иногда устанавливают по пределу усадки. Однако, насколько это справедливо в настоящее время, сказать трудно, так как нельзя считать, что этот вопрос достаточно детально изучен. Из изложенного также видно, что из глинистой породы возможно отделение гравитационной, капиллярной и частично рыхло-связанной воды. Удерживаться в породе может прочно-связанная и частично рыхло-связанная вода.

4. О ЗНАЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ АДСОРБЦИИ ВЛАГИ ГЛИНИСТЫМИ ПОРОДАМИ

Процессы адсорбции влаги глинистыми породами имеют определенное практическое значение, так как позволяют получить некоторое представление о роли связанной воды в глинистых породах в условиях естественного их залегания. Как известно, характернейшей особенностью глинистых пород, отличающей их от всех других отложений, являются значительные размеры суммарной поверхности слагающих их частиц. С этой поверхностью, в результате физико-химических процессов, связывается значительное количество влаги, которая, как было отмечено выше, малоподвижна или практически неподвижна и составляет, по выражению Н. Я. Денисова [17], «мертвые» запасы породы. Связанная вода в той или иной мере может быть удалена из породы лишь при существенном изменении условий ее существования, вызываемом увеличением испытываемого ими давления или появлением возможности испарения влаги. Поэтому глинистые породы, в обычных условиях поверхностной зоны стратисферы, могут рассматриваться как аккумуляторы значительных количеств влаги, исключаемой на геологически длительные сроки из пределов гидросферы.

Накопление влаги в пределах стратисферы путем адсорбции, по отношению ко времени образования глинистых пород, может быть сингенетичным и эпигенетичным. Процессы сингенетичные характерны для отложений водного происхождения (морских, лагунных, озерных, речных), гляциального и делювиально-пролювиального. В породах эолового происхождения процессы адсорбции являются эпигенетичными. Следует заметить, что в зоне гипергенеза связанная вода в любых породах будет являться, видимо, эпигенетичной. Количество и режим влаги в зоне гипергенеза в любых глинистых породах определяются, главным образом, климатическими условиями и поэтому подчиняются физико-географической зональности. Многолетний водный баланс в зоне гипергенеза может существенно изменяться также в результате деятельности человека.

Как известно из изложенного выше, при чрезмерном увлажнении глин в них преобладает свободная вода; по мере дегидратации глин потенциальное значение приобретает вода капиллярная, а затем связанная. Поэтому естественно, что в период накопления глинистых осадков в водном бассейне свободная вода преобладает в этих породах над водой связанной. Влажность таких отложений обычно оказывается равной 90—100 и более процентов. По мере уплотнения осадков все большее относительное значение приобретает вода связанная. Уменьшение количества содержащейся в глинистых породах связанной воды может быть следствием как механического ее удаления при увеличении давления, так и испарения, или того и другого вместе.

На основании многочисленных исследований глинистых отложений Русской платформы известно, что влажность их, как правило, ниже влажности при пределе пластичности, и это указывает, повидимому, на преобладание в них связанной воды.

Так, например, средняя естественная влажность кембрийской глины Прибалтики равна 15—17%, девонских глин Главного девонского поля — 17%, карбоновых глин угленосной свиты Подмосковного бассейна — 20—23%, пермских глин и мергелей Прикамья — 20—23%, юрских глин района Москвы, примерно, 35%, нижне-меловых глин Поволжья — 28—32%, майкопских глин — 25—30%, моренных суглинков — 12—15%. Средняя естественная влажность лессовидных суглинков Восточного Предкавказья Криворожья — 13—14%.

Все приведенные цифры, как правило, меньше значений влажности, соответствующей пределу пластичности пород.

Количество влаги, находящейся в настоящее время в глинистых породах литосферы в связанном состоянии, было подсчитано Н. Я. Денисовым [17] следующим образом. Принимая, в соответствии с Кларком, объем литосферы 6800 млн. $км^3$, объем осадочных пород, составляющих 5% объема литосферы, будет равен 340 млн. $км^3$, а объем глинистых пород соответственно — 270 млн. $км^3$. Вес глинистых пород при объемном весе равном 2, составит 54.10^{16} $т$. Если среднее содержание связанной воды во всей толще глинистых пород принять равным только 2%, то общее количество такой влаги составит 11 млн. $км^3$. Так как поверхность суши составляет 150 млн. $км^2$, то указанное количество влаги могло бы образовать над сушей сплошной слой воды мощностью 66 $м$. Если вспомнить, что влажность глинистых пород в начальных стадиях диагенеза измеряется десятками процентов и затем постепенно уменьшается в связи с выжиманием ее гравитационными силами, то становится понятной количественная сторона процесса дегидратации глинистых осадков.

5. ОПЫТ УПЛОТНЕНИЯ ГЛИН МАЛЫМИ НАГРУЗКАМИ

Уплотняемость горных пород характеризует их механические свойства, поэтому изучением ее часто занимаются в связи с решением различных инженерных задач. Механические свойств глинистых отложений при воздействии на них внешних усилий (нагрузки) проявляются, главным образом, в сопротивлении их сжатию и сдвигу. Показатели, выражающие эти свойства, определяют устойчивость глинистых отложений в основании сооружений и позволяют при конструировании фундаментов предельно использовать несущие их свойства, проектировать откосы земляных сооружений с минимальными земляными работами, определять рациональные сечения подземных выработок, подпорных стенок и т. д.

Внешняя нагрузка, приложенная к массиву горных пород, вызывает их уплотнение, т. е. уменьшение пористости и увеличение объемного веса. Если горная порода насыщена водой, то ее уплотнение возможно при условии выжимания воды из пор породы. При этом уплотнение горной породы обычно происходит до наступления состояния гидростатического равновесия, т. е. состояния, когда из породы будет отжата вся излишняя по отношению к данной нагрузке свободная вода и давление от этой нагрузки полностью будет воспринято гидратными коллоидными оболочками-пленками, всегда покрывающими частицы глинистой породы.

Эти гидратные оболочки противодействуют увеличению плотности сложения глинистой породы под действием сжимающих сил и уравновешивают последние. Толщина гидратных оболочек изменяется не только от величины внешней нагрузки, но и от минералогического состава частиц, слагающих породу, и от состава и содержания электролитов в воде, заполняющей поры породы.

Скорость выжимания воды, а следовательно, и скорость уплотнения породы зависят, как известно, от водопроницаемости горной породы. В соответствии с этим в песках гидростатическое равновесие наступает быстро, а в глинах медленно.

Уплотнение глинистых горных пород может происходить не только под действием внешних сил, но и под действием молекулярных напряжений, развивающихся на границе твердой и жидкой фаз породы при ее высушивании. При высушивании породы вначале происходит испарение той части влаги, которая, заполняя поры породы, не связана физически сколько-нибудь прочно с поверхностью частиц. Дальнейшее испарение влаги вызывает уменьшение толщины пленок воды, обволакивающих частицы породы, а это вызывает сближение частиц и, как следствие, уменьшение общего объема породы. Наибольшего напряжения молекулярные силы достигают на пределе усадки породы, после которого уже не происходит значительного изменения ее объема. В крупнозернистых породах молекулярные силы на контакте твердой и жидкой фаз незначительны: практически равны нулю. Поэтому пески при высушивании не уплотняются, а получают кажущееся разрыхление.

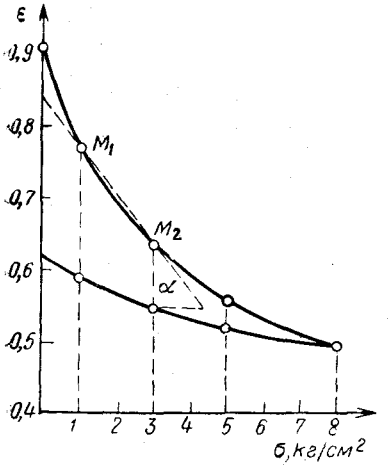


Рис. 4. Компрессионная кривая

В глинистых породах молекулярные силы могут быть значительными, поэтому такие породы при высыхании обычно уплотняются и приобретают большую связность. Вопреки общепризнанному представлению о связности глинистых пород, новейшие исследования показывают, что связность их обусловлена не только молекулярными и капиллярными силами, но и пленками коллоидальных растворов, образующимися на поверхности частиц, слагающих породу, которые в результате дегидратации цементируют породу и повышают ее механическую прочность.

Таким образом, уплотнение рыхлых пород — песчаных и глинистых — или высушивание преимущественно глинистых пород вызывает изменение их пористости. При оценке сжимаемости пород важно выяс-

нить зависимость между нагрузкой и пористостью породы или между нагрузкой и влажностью. Эта зависимость для рыхлых грунтов весьма характерна, она подчиняется определенному закону и выражается обычно в виде компрессионной кривой (рис. 4).

Действие молекулярных сил в глинистых породах может быть значительное, поэтому при изучении зависимости между влажностью (пористостью) и нагрузкой, с целью устранения влияния этих сил, испытание пород производят под водой. На компрессионной кривой (рис. 4) видно, что определенной нагрузке σ_1 соответствует определенный коэфициент пористость ε_1 или эквивалентная ему влажность. При увеличении нагрузки до σ_2 коэфициент пористости уменьшается до ε_2.

Если изменение давления будет мало, т. е. $\sigma_2 - \sigma_1 = d\sigma$, то и коэфициент пористости изменится мало, т. е. $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = d\varepsilon$. Малый участок компрессионной кривой M_1M_2 можно принять за прямую. Тангенс угла наклона этого участка кривой характеризует сжимаемость породы при данном интервале давления:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_1} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma}.$$

Чем больше величина $\operatorname{tg}\alpha$, тем порода слабее, так как она сильнее уплотняется в пределах заданного интервала давлений.

Тангенс угла наклона компрессионной кривой $\operatorname{tg}\alpha$ обозначают через a и называют коэфициентом сжимаемости. Так как ε отвлеченное число, а σ измеряется в *кг/см²*, то a выражают в *см²/кг*.

Числовое значение коэфициента a при небольшой нагрузке характеризует породу как

сильно сжимаемую, если $a > 0{,}05$ *см²/кг;*
средне сжимаемую, если $a = 0{,}01$—$0{,}05$ *см²/кг;*
слабо сжимаемую, если $a < 0{,}01$ *см²/кг.*

Из приведенного выше равенства вытекает следующее:

$$d\varepsilon = a\,d\sigma.$$

Это уравнение выражает основной закон строительной механики грунтов: относительное изменение объема пор породы прямо пропорционально изменению давления. Закон выражает зависимость между давлением и коэфициентом пористости и считается справедливым для любых пород — песчаных, глинистых и др.

Новейшие исследования показывают, что глинистые породы в природных условиях в некоторых случаях этому закону не подчиняются и при одинаковом давлении могут обладать различной плотностью. Это объясняется тем, что определенная величина пористости пород в некоторых случаях не может являться следствием воздействия только определенной нагрузки. Сжатие породы в процессе накопления слагающих ее частиц и в стадии диагенеза происходит под давлением силы тяжести, преодолевающей силы трения и сцепления между частицами. При этом эффект уплотнения пород при одинаковом давлении будет различным в зависимости от состояния породы, т. е. будет уплотняться во влажном или сухом состоянии, при наличии цементации породы или при отсутствии ее и т. д.

Так как коэфициент сжимаемости $a = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_1}$, можно написать что $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = a(\sigma_2 - \sigma_1)$, раскрывая скобки и группируя члены, получим:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = a\sigma_2 - a\sigma_1$$

или

$$\varepsilon_1 + a\sigma_1 = \varepsilon_2 + a\sigma_2, \quad \varepsilon_n + a\sigma_n = \text{const}.$$

Обозначая эту постоянную величину через A, получим уравнение, окончательно связывающее пористость породы с нагрузкой:

$$\varepsilon = A - a\sigma.$$

Если в этом выражении $\sigma = 0$, то постоянная величина A будет равна коэфициенту пористости породы при нагрузке, равной нулю, т. е. $A = \varepsilon_0$. На графике, изображенном на рис. 4, величина A представляется как начальный параметр компрессионной кривой, отсекаемый на оси продолжением прямой $M_1 M_2$. Выбор точек M_1 и M_2 на компрессионной кривой при определении коэфициента сжимаемости a не может быть случайным, а должен быть подчинен определенному правилу. Координаты точки M_1 должны соответствовать естественной природной нагрузке на породу σ_1 и естественному коэфициенту пористости ε_1 на глубине h_1. Координата точки M_2 должна соответствовать конечной нагрузке на грунт σ_2 после возведения сооружения или естественной нагрузке на породу на глубине h_2. По конечной нагрузке σ_2 на компрессионной кривой находят значение ε_2.

Мерой компрессионной способности породы может быть также «модуль» компрессии породы l, выражающий относительную деформацию породы, т. е. представляющий величину сжатия слоя породы от нагрузки σ *кг/см²*, отнесенную к первоначальной мощности слоя. Часто модуль компрессии определяют как величину сжатия слоя породы мощностью 1 *м* под нагрузкой σ *кг/см²*. Размерность этого показателя выражают в процентах или *мм/м* (осадка в миллиметрах слоя породы мощностью 1 *м*). Модуль компрессии может быть вычислен по следующей формуле:

$$l = 100\,\frac{\Delta h}{h},$$

где l — модуль компрессии;

Δh — величина, на которую изменилась высота образца породы при полной стабилизации его уплотнения от данной нагрузки;

h — первоначальная высота испытуемого образца породы.

Как видно на рис. 4, каждая компрессионная кривая может иметь две ветви — кривую уплотнения и кривую разбухания. Кривая уплотнения показывает уменьшение коэфициента пористости или влажности в связи с увеличением нагрузки, а кривая набухания — увеличение коэфициента пористости после уменьшения нагрузки. При этом коэфициент пористости породы после снятия нагрузки никогда не достигает того значения, которое он имел в начале опыта. Это объясняется образованием остаточных деформаций, которые проявляются в породах.

Кривые уплотнения и набухания являются логарифмическими, уравнения которых имеют вид:

для кривой уплотнения

$$\varepsilon = -c\ln(P + P_e) + C_1$$

и для кривой набухания

$$\varepsilon = -A\ln(P + P_i) + C_2,$$

где

ln — натуральный логарифм;

ε — коэфициент пористости,

P — давление, соответствующее данному коэфициенту пористости, *кг/см²*,

P_e — постоянная породы, имеющая измеренное давление и соответствующая начальному коэфициенту пористости,

P_i — постоянная грунта, имеющая измеренное давление, соответствующая коэфициенту пористости при полной разгрузке породы,

c — коэфицент уплотнения породы (или коэфициент сжимаемости, обозначаемый чаще через a);

A — коэфициент разбухания породы,

C_1 и C_2 — постоянные интегрирования.

Из приведенного видно, что уплотняемость глинистых отложений связана с изменением их пористости или влажности. При этом изменение влажности является следствием выжимания воды из породы при воздействии нагрузки.

При стабилизации уплотнения глинистой породы влажность обычно соответствует определенной нагрузке и может быть выражена количественно.

6. ОПЫТ ОТЖИМАНИЯ РАСТВОРОВ ИЗ ГЛИН БОЛЬШИМИ НАГРУЗКАМИ

Как было отмечено выше, экспериментальные работы по уплотнению глинистых отложений большими нагрузками и отжиманию из них растворов были единичны. Наиболее известным исследованием являются работы, выполненные бывшим Управлением Соликамского гидроузла. В районе проектируемого в то время Соликамского гидроузла на р. Каме основанием сооружений должна была являться мощная толща глинисто-мергелистых пород кунгура, подстилаемая толщей солей того же возраста. Глинисто-мергелистая толща в большом количестве содержит водно-растворимые соли. Поэтому вопрос о форме нахождения солей в этих породах и о взаимоотношениях между ними и поровыми водами представляет большой интерес. Предполагалось, что соли, растворенные в поровых водах, должны были определять состав поглощенных оснований и, следовательно, свойства этих пород. Удаление солей, например, путем выщелачивания может привести к изменению свойств этих пород.

Таким образом, все это вызвало необходимость изучения поровых вод. На Соликамском гидроузле с целью определения минерализации поровых вод было опробовано 14 буровых скважин и выполнено около 40 неполных химических анализов поровых вод. Поровые воды из образцов породы получались путем отжимания их в специально изготовленных для этой цели приборах — цилиндрах с сетчатым дном и точно пригнанным поршнем. Методика отжимания сводилась к следующему. Образец породы естественной влажности весом 100 *г* загружался в прибор. Прибор в собранном виде устанавливался под гидравлический пресс и подвергался сжатию под давлением 1000 *кг/см*^{2}. Конечное давление давалось не сразу, а в течение 2—3 часов, во избежание продавливания грунта сквозь решетку. Давление 1000 *кг/см*^{2} обеспечивало отжатие 50—60% общего количества влаги, находящейся в образце. Собранная в специальный приемник вода поступала на химический анализ для определения содержания Cl и SO_4 *г/л*. Так как анионы Cl и SO_4 находились в растворе, вероятно, в соединении с катионами солей NaCl и $CaSO_4$, то полученные данные были пересчитаны на солевую формулу. По данным была подсчитана также вероятная минерализация поровых вод.

На основании проведенных исследований было установлено, что минерализация поровых вод глинисто-мергелистой толщи с глубиной постепенно увеличивается.

Если в верхних горизонтах глинисто-мергелистой толщи минерализация поровых вод достигала 5—10 и реже 40 *г/л*, то на больших глубинах она доходила до 100—120 *г/л* и в контактной зоне с солью — до 340 *г/л*.

Анализы поровых вод показали, что степень их минерализации, примерно, равна минерализации пластово-трещинных вод. Изменение же минерализации поровых вод с глубиной происходит постепенно и более плавно, чем изменение минерализации пластово-трещинных вод с глубиной.

Экспериментальные данные позволяют также считать, что при существующих условиях естественной влажности пород глинисто-мергелистой толщи нахождение хлористого натрия в этих породах возможно только в растворенном состоянии. Более низкая растворимость в воде сернокислого кальция дает возможность обнаружить его в этих породах в кристаллической форме.

Не менее интересными и значительными для разрабатываемой темы являются исследования поровых вод юрских глин (I_3^{oxf}) и карбоновых известняков (C_3'), выполненные сотрудниками Лаборатории гидрогеологических проблем Академии наук СССР — Н. А. Бунеевым, П. А. Крюковым и Е. Б. Ренгартеном [7]. Для выделения растворов служила методика отпрессовывания при сверхвысоких давлениях, разработанная П. А. Крюковым применительно к выделению почвенных растворов. Для отпрессовывания растворов применялись специально сконструированные приборы.

Последовательно выделявшиеся из породы фракции воды собирались и анализировались. Породы для описываемых исследований брались с естественной влажностью. Так, например, начальное содержание

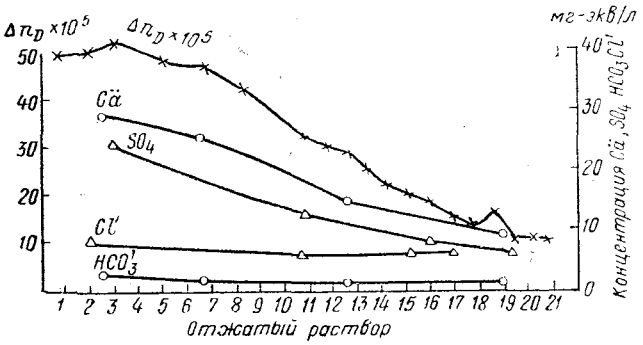


Рис. 5. Изменение минерализации (Δn_D) и концентрации отдельных ионов в растворе, отжимаемом из юрской глины по А. Н. Бунееву, П. А. Крюкову, Е. В. Ренгартен

воды в навеске глины составляло 33,5 *г* (31%). Прилагая давление от 1450 до 6000 *кг/см*^{2}, удалось выделить 21,7 *г* или 64,6% всей воды, содержавшейся в глине. Отжимание длилось 32 дня. Ход изменения состава последовательных порций отжимавшегося раствора изображен на рис. 5.

Опыт с известняками, имеющими естественную влажность 9,8% показал, что только при достижении давления 4300 *кг/см*^{2} из них начинает отделяться вода; повышая давление до 6500 *кг/см*^{2}, удалось выделить около 50% содержащейся в известняке воды.

Полученный экспериментальный материал позволил авторам сделать следующие основные выводы.

1. Показана возможность выделения воды из плотных коренных осадочных пород естественной влажности путем отжимания.

2. Исследование химического состава последовательно выделяющихся порций воды показало непрерывное понижение их минерализации. Минерализация последних порций составляла около 20% от минерализации начальных.

3. Концентрация отдельных ионов уменьшается параллельно понижению общей минерализации раствора.

4. Аналогичные явления происходили с глиной, высушенной на воздухе растертой и замешанной вновь дестиллированной водой. Следовательно, поведение глины при отжимании не связано с какими-либо особенностями ее структуры, возникшими за геологическое время ее существования.

5. Факт понижения минерализации отжимающейся воды указывает на отдачу породой при высоких давлениях связанной воды.

7. ОПЫТ ОТЖИМАНИЯ НЕФТИ ИЗ ГЛИН

Из известных нам экспериментальных работ по отжиманию нефти из глин являются работы сотрудника Института нефти Академии наук СССР С. Л. Закса, а также работы Ван-Тайла и Бэкстрома (9).

Ван-Тайл и Бэкстром дают следующие описания своих опытов. В опытах применялся стальной цилиндр внутреннего диаметра в 105 *мм*, плотно закрытый с одного конца и снабженный точно пригнанным поршнем. Цилиндр последовательно загружался в различных пропорциях осадочными материалами, насыщенными, по меньшей мере частично, водой или нефтью, либо флюидами одновременно. Содержимое цилиндра уплотнялось под давлением приводимого в движение поршня. Количество выжимавшихся при этом флюидов замерялось, и они подвергались исследованию.

В первом опыте цилиндр был загружен 1000 *см*^{3} среднезернистого песка, обладающего пористостью в 42,6%, затем в цилиндр последовательно добавлялось 213 *см*^{3} легкой нефти из месторождения Солт-Крик. Давление увеличивалось ступенями порядка 900—2700 *кг* с интервалами в несколько минут и было доведено до 20400 *кг* (236 *кг/см*^{2}). При низких давлениях вода выжималась скорее, чем нефть. Количество выделившейся нефти возрастало по отношению к воде по мере увеличения давления. Это отношение стало значительным при более высоких давлениях, хотя общий объем выделившейся жидкости был невелик. Максимальное давление 20400 *кг* поддерживалось в течение 6 час. 9 мин. При этом наблюдалось лишь незначительное дополнение уплотнения, и выделился только 1 *см*^{3} жидкости. Весь опыт продолжался в течение 8 час. Общий объем выделившихся флюидов составил 115 *см*^{3} воды и 93 *см*^{3} нефти. Большая часть этой жидкости выделилась в течение первых 1,5 час. при давлении ниже 18 тыс. *кг*.

Опыт был повторен со следующим изменением: песок в цилиндре насыщался сначала нефтью, а потом водой. При этих условиях опыта общий объем жидкости, выделившейся из цилиндра, был несколько

больше, а относительное содержание воды по отношению к нефти несколько выше.

В следующем опыте цилиндр загружался мелкозернистым песком с пористостью в 40%, и песок пропитывался сначала водой, а потом нефтью. В результате под давлением выделялась преимущественно нефть. По мере увеличения давления относительное количество выделявшейся воды несколько возрастало, но в конечном итоге отношение выделившейся воды к нефти оказалось все же значительно меньшим, чем в первом опыте. Это было обусловлено, очевидно, капиллярностью пор мелкозернистого песка.

В дальнейшем была поставлена серия опытов, при которых в цилиндры помещались сланцы и пески различной крупности зерна. Взаимное расположение пород варьировалось в отдельных опытах; менялся также удельный вес нефти, вводившейся в цилиндры. В результате этой серии опытов авторы пришли к следующим выводам.

Легкая нефть выжимается из мелкозернистой породы в крупнозернистую и накапливается в последней, вытесняя из нее воду. При дальнейшем сравнительно небольшом повышении давления происходит выжимание легкой нефти и из крупнозернистой породы. Тяжелая нефть также выжимается в более крупнозернистую породу, однако при дальнейшем повышении давления в этом случае из породы выжимается, главным образом, только вода. Выжимание легкой нефти происходит вообще свободнее, чем выжимание тяжелой нефти, что объясняется различной вязкостью этих нефтей.

Показательно, что, хотя некоторые из этих опытов продолжались в течение 10 час., выжимание флюидов происходило в основном в течение первых двух часов. Для перемещения такого же количества флюидов под влиянием капиллярных сил потребовалось бы несколько дней или даже недель.

Несколько позже, в 1928 г., были поставлены опыты, при которых применялось более тяжелое оборудование. Давление, доводившееся до 7030 *кг/см*^{2}, поддерживалось в течение 15 часов. При этом из тонкозернистых бентонитовых сланцев было выжато 99% содержавшейся в них первоначально нефти и 92,7% воды.

Был проведен также опыт, при котором в нижней части цилиндра генерировался углекислый газ, и в цилиндре поддерживалась температура в 45 °С. Давление доводилось лишь до 343 *кг/см*^{2}. Общий объем выделившихся флюидов оказался значительно больше, чем при таком же давлении в прежних опытах. При этом выжимание флюидов произошло в основном в течение 15 мин., в момент максимального выделения газа.

Описанные эксперименты показывают, что как нефть, так и вода могут выжиматься давлением из пропитанных нефтью сланцев в песок или из мелкозернистого песка в крупнозернистый песок. Выжимание нефти происходит более интенсивно, если мелкозернистая порода предварительно смочена водой. Незначительное повышение температуры и присутствие газа также способствуют выжиманию нефти. В ходе опытов наблюдалось значительное уплотнение осадков при повышении давления до величины, соответствующей давлению в недрах на глубине около 900 *м*. Дальнейшее длительное и очень сильное повышение давления приводит почти к полному уплотнению осадков и выжиманию флюидов, содержащихся в них.

Интересные, но немногочисленные опыты (7 опытов) по выжиманию нефти и воды из горных пород были осуществлены научным сотрудни-

ком Института нефти Академии наук СССР — Е. А. Заксом. Для исследования им были использованы как глинистые, так и песчаные породы. Была принята методика, разработанная П. А. Крюковым, используемая для выделения почвенных растворов.

В результате проведенных опытов автором были сделаны следующие выводы.

1. Вопреки существующим сомнениям, отжатие воды из нефтеносных песчаников возможно, однако применявшиеся давления (до 8600 *атм*) были недостаточными для полного отжатия.

2. Количество отжимаемой воды зависит от первоначального содержания ее в песчанике. При содержании 1% воды рассчитывать на какую-либо отдачу воды не приходится.

3. Непременным условием успеха отпрессования воды является заполнение свободного порового пространства нефтью так, чтобы суммарная водонефтенасыщенность составляла 70% объема пор. Из этого как бы следует, что для отжатия воды из слабонасыщенных пород потребуется предварительно донасытить их нефтью или какой-либо другой жидкостью, не смешивающейся с водой (например, вазелиновое масло).

4. Если нефти очень мало (10% объема пор), а воды по отношению к нефти много, то нефть не выделяется, вытекает только вода. Если же ее содержание составляет 35%, из объема пор вытекает сначала и нефть и вода, а затем уже при более высоких давлениях — одна вода. Образцы, содержащие одинаковое количество нефти и воды или нефти больше, вначале выделяют чистую нефть, затем — нефть вперемежку с водой, а затем — чистую воду.

5. Возможно, для отжатия воды давление свыше 5—10 тыс. *атм* и не потребуется.

6. Для отжатия воды из плотных глин давление порядка 10000 *атм* может оказаться недостаточным.

РАЗДЕЛ II

1. МЕТОДИКА РАБОТЫ

Как отмечалось выше, в 1949 г. на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Ленинградского горного института были начаты исследования условий выжимания воды и нефти из глин. С этой целью был поставлен первый цикл предварительных опытов с водой и нефтью, позволивший опробовать выбранную методику, сделать предварительные выводы и наметить пути для дальнейшего исследования этого вопроса.

В первом цикле опытов была принята методика, применяющаяся при компрессионных испытаниях горных пород, позволяющая получить зависимость между влажностью (нефтенасыщенностью) и нагрузкой. При опытах с нагрузками до 60—70 *кг/см*^{2} использовались компрессионные приборы конструкции Центрального научно-исследовательского автодорожного института (ЦИАТа), а при опытах с нагрузками до 1000 *кг/см*^{2} — компрессионные приборы конструкции П. А. Крюкова [27], предназначенные для испытаний грунтов при высоких и сверхвысоких давлениях.

Компрессионный прибор ЦИАТа (рис. 6) представляет собой латунный цилиндр с внутренним диаметром 41,5 *мм*, разделенный на две неравные части (*1, 2*). Нижняя — меньшая часть цилиндра (*2*) имеет

решетку (*3*), на которой уложен пористый камень (*4*). Внутренняя часть цилиндра имеет расточку высотой 25 *мм*, в которую вставлено кольцо (*5*) с тем же внутренним диаметром, что и цилиндр (41,5 *мм*). В это кольцо загружается испытуемая горная порода. Сверху в кольцо вставляется цилиндрический штамп (*6*) с дырчатым дном. Цилиндрический штамп имеет мессуродержатель (*7*). Прибор в собранном виде помещается в специальную ванну (*8*).

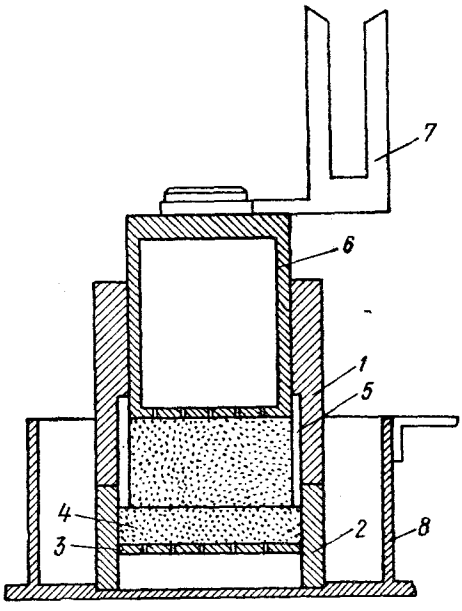


Рис. 6. Компрессионный прибор конструкции ЦИАТа:

1 — верхняя часть цилиндра, *2* — нижняя часть цилиндра, *3* — решетка нижней части цилиндра, *4* — пористый камень, *5* — рабочее кольцо, *6* — штамп, *7* — мессуродержатель, *8* — ванна

Выжимание воды и нефти из глин в этом приборе производилось следующим образом.

Из глин с водой и нефтью приготовлялась грунтовая масса консистенции, близкой к пределу текучести. В таком состоянии глина выдерживалась в эксикаторе в течение 1—2 суток, чтобы в ней равномерно распределилась влажность. Затем она использовалась для испытаний. При испытаниях глина загружалась в рабочее кольцо прибора на высоту 20 *мм*. Перед наполнением рабочего кольца глиной оно взвешивалось на технических весах. Одновременно с наполнением рабочего кольца испытуемой глиной отбиралась проба для определения ее влажности перед опытом. Затем рабочее кольцо с глиной с обеих сторон покрывалось фильтровальной бумагой, предварительно смоченной водой. Прибор собирался и устанавливался под рычажный пресс. Рычаг пресса при этом приводился в горизонтальное положение с помощью уравнительного противовеса на рычаге. В дальнейшем ход опыта состоял в уплотнении глины ступенями нагрузки и определении коэфициента пористости и влажности глины, соответствующих каждой ступени нагрузки. Размер первой ступени нагрузки был принят равным 1 *кг/см*^{2}, второй 5 *кг/см*^{2}, а всех остальных по 10 *кг/см*^{2}.

Для большинства опытов конечная нагрузка при работе с прибором ЦИАТа равнялась 60 *кг/см*^{2}. В результате общее число ступеней нагрузки было равно восьми (1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 *кг/см*^{2}). В тех случаях, когда конечная нагрузка была равна 70 *кг/см*^{2}, число ступеней равнялось девяти

Под каждой ступенью нагрузки глина выдерживалась до стабилизации уплотнения. Стабилизация уплотнения считалась законченной, если последние три отсчета по мессуру через определенный интервал времени от начала опыта были одинаковыми. При всех опытах стабилизация уплотнения обычно завершалась в течение 1—2 суток. При уплотнении глины применялись меры для предупреждения ее от высыхания.

После стабилизации уплотнения глины от той или иной ступени нагрузки определялся коэфициент пористости и влажность глины, соответствующие этой нагрузке. Влажность глины до опыта и для последней ступени нагрузки определялась весовым методом. Влажность глины для всех остальных ступеней находилась по коэфициенту пористости, который, в свою очередь, определялся высотным (мессурным) методом. При высотном (мессурном) методе коэфициент пористости глины, соответствующий той или иной ступени нагрузки, вычислялся по следующей формуле:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 - \frac{\Delta h}{h}(1 + \varepsilon_1),$$

где

ε_n — коэфициент пористости, соответствующий той или иной ступени нагрузки;

ε_1 — начальный коэфициент пористости глин;

h — начальная высота образца глины, загруженной в рабочее кольцо прибора;

Δh — величина, на которую изменилась высота образца после стабилизации уплотнения глины от той или иной ступени нагрузки.

В проводимых опытах при вычислении коэфициента пористости глины вносилась поправка на деформацию прибора. После определения коэфициента пористости и влажности грунта, соответствующих каждой ступени нагрузки, строились компрессионные кривые.

Компрессионным прибором конструкции П. А. Крюкова (рис. 7) испытывают горные породы на сжатие при давлениях до 10 000 *кг/см*^{2}. Основной частью прибора является толстостенный цилиндр (*1*) из термически обработанной хромово-ванадиевой стали с наружным диаметром 12 *см* и внутренним 2 *см*. Высота цилиндра 5 *см*.

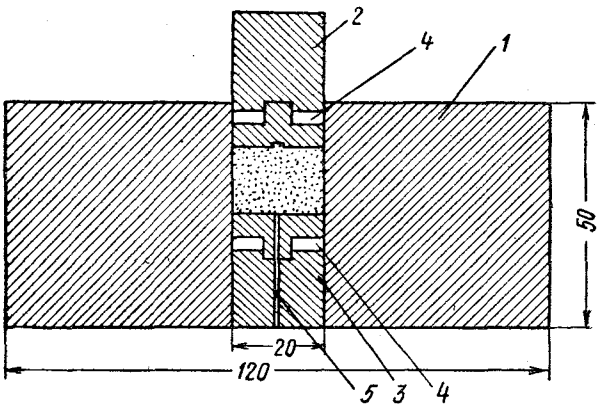


Рис. 7. Компрессионный прибор конструкции П. А. Крюкова:

1 — цилиндр, *2*, *3* — поршни, *4* — кожаные сальники, *5* — отверстие в поршнях для воды и нефти

Образец глины высотой 15—20 *мм* закладывается в цилиндр между двумя поршнями (*2* и *3*) из закаленной шарикоподшипниковой стали. Поршни точно пришлифованы по внутреннему диаметру цилиндра и имеют кожаные сальники (*4*). Для отжимаемой воды и нефти из глин в поршнях устроено отверстие (5). При загрузке прибора грунтом по-

верх поршней укладывались перфорированные стальные пластинки и влажные листочки фильтровальной бумаги.

Испытание глин в приборе П. А. Крюкова производилось при нагрузках до 1000 *кг/см*². Подготовка глин к испытанию была та же, что и при опытах с малыми нагрузками на приборе ЦИАТа. Уплотнение глин производилось на 100-тонном гидравлическом прессе только при четырех ступенях нагрузки: 60, 150, 500 и 1000 *кг/см*². Каждая ступень нагрузки давалась постепенно в течение 1—2 час. во избежание продавливания грунта сквозь перфорированную пластинку. Влажность и нефтенасыщенность для каждой ступени нагрузки определялись только весовым методом после стабилизации уплотнения глин. Поэтому для каждой ступени нагрузки закладывался новый образец глины. Для стабилизации уплотнения глины образец выдерживался под прессом не менее суток. По полученным данным строились компрессионные кривые.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ГЛИН, ВЫБРАННЫХ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

Для экспериментальных работ вначале было выбрано несколько разностей глин, над которыми выполнялась первая серия опытов. После определения гранулометрического и минералогического составов глин все дальнейшие опыты производились только с тремя разностями: с ленинградской кембрийской глиной, с каолином из месторождений «Красная шапочка» и с бентонитом из Оглаилинского месторождения. Четвертой разностью пород, над которой были выполнены все опыты с водой и нефтью, являлся чистый кварцевый песок — маршалит.

Таким образом, все основные опыты по выжиманию воды и нефти были проведены с маршалитом (кварцевым песком), кембрийской глиной, каолином и бентонитом.

Выбор типов пород для опытов определился двумя обстоятельствами: во-первых, образцы этих пород имели достаточные резмеры для того, чтобы опыты можно было бы повторить несколько раз, а во-вторых, в минералогическом составе каждой из глин преобладали определенные глинистые минералы, т. е. выбранные глины, как и кварцевый песок, в значительной степени являлись мономинеральными.

Переходя к краткой характеристике состава каждого образца этих пород, остановимся прежде всего на их гранулометрическом составе, представленном данными табл. 3.

Таблица 3

Название породы	Содержание фракций, %				
	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,002	0,002—0,001	0,001
Маршалит . . .	16	57	21	3	3
Кембрийская глина .	—	17	36	11	36
Каолин	—	10	24	18	48
Бентонит	—	7	19	27	47

Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что в составе маршалита преобладают пылеватые фракции (0,05—0,002 *мм*), содержание которых достигает 78%; содержание фракций песчаных (0,25—0,05 *мм*) и глинистых (0,002 *мм*) в маршалите ничтожно. Поэтому маршалит по гранулометрическому составу может быть классифицирован, как песчаная,

слегка глинистая пыль. Удельный вес маршалита типичен для кварцевого песка — 2,64.

Кембрийская глина содержит более 30% глинистых фракций, а пылеватых более 50%, поэтому может быть отнесена к глинам пылеватым. Удельный вес кембрийской глины равен 2,80.

Каолин и бентонит по содержанию глинистых фракций (больше 60%) могут быть отнесены к типичным глинам, в составе глинистых фракций которых (0,002 *мм*), повидимому, содержится значительное количество коллоидальных частиц. Удельный вес каолина равен 2,60, бентонита 2,68.

Исследования минералогического состава маршалита и глин показали следующие результаты. Рентгенограмма маршалита состоит из 42 линий на чистом фоне, из которых 35 относятся к линиям кварца. Семь слабых линий остались нерасшифрованными. При сравнении интенсивностей эталона и порошкограммы В. И. Михеев установил, что в составе маршалита содержится до 90—95% кварца и 5—10% какой-то другой кристаллической фазы.

Результаты рентгеноскопических исследований маршалита полностью подтверждаются результатами термического анализа (рис. 8). Кривая нагревания дает резкий эндотермический эффект при 590° и более слабые при 275 и 875°, что указывает на существенно кварцевый состав породы. Появление других эндотермических эффектов, по свидетельству В. Д. Никитина, указывает наличие небольших примесей к кварцу других минеральных компонентов.

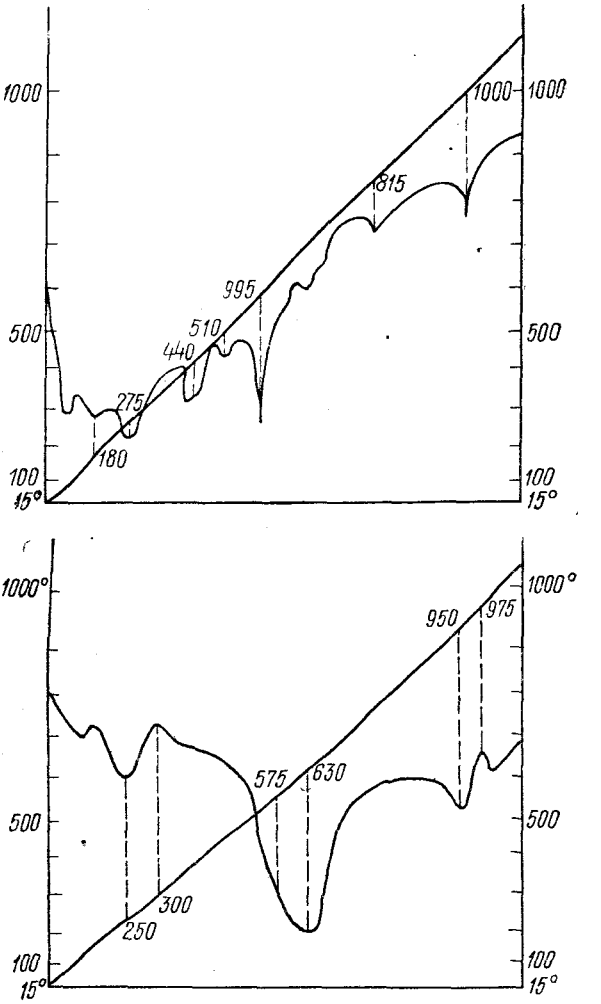


Рис. 8. Маршалит (2471). Глина кембрийская (1994)

Рентгенограмма кембрийской глины обнаружила 42 линии различной интенсивности на фоне средней завуалированности. Из 42 линий 20, как обнаружено, относятся к минералу браммалиту, остальные — к хлориту и кварцу. Учтя характер рентгенограммы, В. И. Михеев установил, что 50% кристаллической фазы кембрийской глины состоит из браммалита, 30% из хлорита и 20% — из кварца.

Кривая нагревания кембрийской глины вполне подтверждает выводы по рентгенограмме.

Рентгенограмма каолина дала без заметной вуали 55 довольно четких линий. Сравнение полученной рентгенограммы с эталонной привело В. И. Михеева к утверждению о том, что исследуемая порода является типичным 95-процентным каолинитом, содержащим менее 5% примесей. На полученном снимке линии минералов четкие и тонкие, следовательно, каолинит не сильно дисперсен.

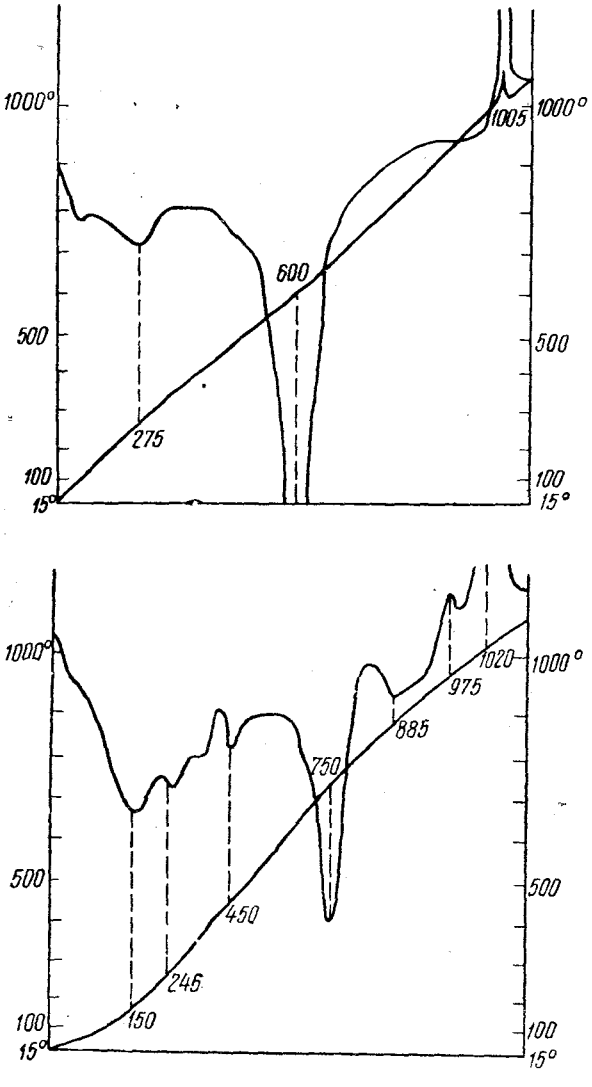


Рис. 9. Каолин (2507). Бентонит (2508).

Рентгенограмма бентонита состоит из 26 линий. Сравнивая интенсивность линий эталонов с линиями пробы, В. И. Михеев заметил, что кристаллическая фаза бентонита содержит приблизительно 70% монтмориллонита и меньшее 5% какой-то примеси. В литературе подобная смесь носит название бентонит.

Кривые нагревания каолина и бентонита (рис. 9), по заключению В. Д. Никитина, являются типичными для подобного рода пород и указывают на существенно каолинитовый состав первого и монтмориллонитовый состав второго.

Из приведенной характеристики видно, что для испытаний были выбраны действительно наиболее типичные разности горных пород.

Маршалит представляет собой чистый кварцевый песок. Кварцевый песок, как известно, является невлагоемким, обладает хорошей водоотдачей, мало и быстро сжимаем.

Каолин состоит почти нацело из минерала 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 минерала монтмориллонита, являющегося представителем второй группы (из извест-

ных трех) глинистых минералов. Он является наиболее гидрофильным по сравнению с другими глинистыми минералами, имеет менее устойчивую кристаллическую решетку, сильно набухает и значительно сжимаем.

В составе кембрийской глины решающую роль играет минерал браммалит, содержание которого достигает 50%. Минерал браммалит входит в состав третьей группы глинистых минералов, свойства которых имеют промежуточные значения между свойствами каолинитовой и монтмориллонитовой групп минералов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ ПО ВЫЖИМАНИЮ ВОДЫ ИЗ ГЛИН

Опытов по выжиманию воды из глин было выполнено 16, не считая, примерно, 25, выполненных предварительно с целью опробования приборов, установления времени консолидации глин при уплотнении и способа загрузки приборов. Кроме того, часть опытов оказалась неудачной из-за поломки приборов, продавливания грунта через решетку прибора и т. д.

Как отмечалось выше, вначале испытанию подвергалось большое количество разностей глин, но после установления методики работ и изучения состава глин все остальные опыты производились только с тремя разностями. Четвертый породой при всех опытах являлся маршалит.

Таким образом, из 16 основных опытов первая группа опытов состояла из восьми, вторая из четырех и третья тоже из четырех. Первая и вторая группы опытов выполнены при нагрузках до 60—70 *кг/см²*, третья — до 1000 *кг/см²*. Результаты первой группы опытов по основным разностям пород, подвергнутых испытаниям, изображены на рис. 10 и сведены в табл. 4.

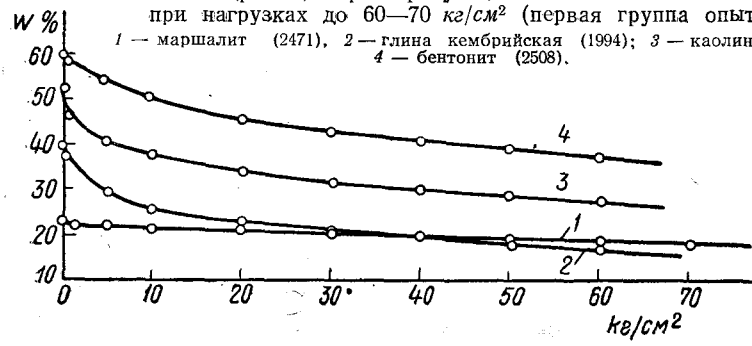


Рис. 10. Кривые, характеризующие изменение влажности глин при нагрузках до 60—70 *кг/см²* (первая группа опытов):
1 — маршалит (2471), *2* — глина кембрийская (1994); *3* — каолин (2507), *4* — бентонит (2508).

Таблица 4

Нагрузка, *кг/см²*	Влажность, %			
	маршалит	кембрийская глина	каолин	бентонит
0,0	22,3	39,5	52,4	59,6
1,0	22,2	36,9	46,1	59,0
5,0	22,0	28,9	41,2	54,2
10,0	21,9	25,9	37,7	50,2
20,0	21,5	22,7	34,1	45,1
30,0	21,1	20,4	31,7	42,5
40,0	20,7	19,6	29,9	40,5
50,0	20,3	17,5	28,6	38,5
60,0	19,9	16,9	27,3	36,5
70,0	19,5	—	—	—
Отжато воды, %	11	57	48	39

Как видно на рис. 10 и табл. 4, начальная влажность всех разностей пород была различна, хотя все они загружались в прибор при консистенции, близкой к пределу текучести. Следовательно, гидрофильность — влагоемкость — и степень влажности их различны. Чтобы различного состава глины привести, примерно, к одному состоянию, их насыщали различным количеством влаги. Различна и конечная влажность глин, уплотненных одной и той же нагрузкой. Хотя гидрофильность глин зависит не только от минералогического состава, но также и от состава поглощенных оснований, тем не менее полученные данные наглядно характеризуют влияние минералогического состава.

Влияние минералогического состава существенно сказалось и на эффекте выжимания воды из глин. Все кривые уплотнения глин, по мере увеличения нагрузки, постепенно асимптотически выравниваются параллельно оси абсцисс, однако потеря влажности происходит различная. Кембрийская глина теряет влаги 57%, каолин 48%, а бентонит 39%. Маршалит — кварцевый песок — влаги, по сравнению с глиной, содержит меньше и, являясь мало сжимаемым, мало отдает влаги.

Результаты второй группы опытов, проведенных с теми же разностями пород и при тех же условиях, полностью подтвердили результаты первой группы опытов. Они изображены на рис. 11 и сведены в табл. 5.



Рис. 11. Кривые, характеризующие изменение влажности глин при нагрузках до 60—70 *кг/см²* (вторая группа опытов):
1 — маршалит (2471), *2* — глина кембрийская (1538), *3* — каолин (2507), *4* — бентонит (2508)

Таблица 5

Нагрузка, *кг/см²*	Влажность, %			
	маршалит	кембрийская глина	каолин	бентонит
0,0	27,3	31,1	40,5	58,3
1,0	26,9	28,4	39,2	56,7
5,0	25,9	23,8	34,8	50,5
10,0	25,4	22,3	33,5	44,7
20,0	24,9	19,2	31,2	39,0
30,0	24,6	18,1	29,8	36,1
40,0	24,5	17,1	28,6	33,6
50,0	24,3	16,7	27,7	32,1
60,0	24,1	16,2	26,5	31,5
Отжато воды, %	12	50	60	46

Результаты третьей группы опытов, проводившихся при нагрузках до 1000 *кг/см²*, изображены на рис. 12 и приведены в табл. 6.

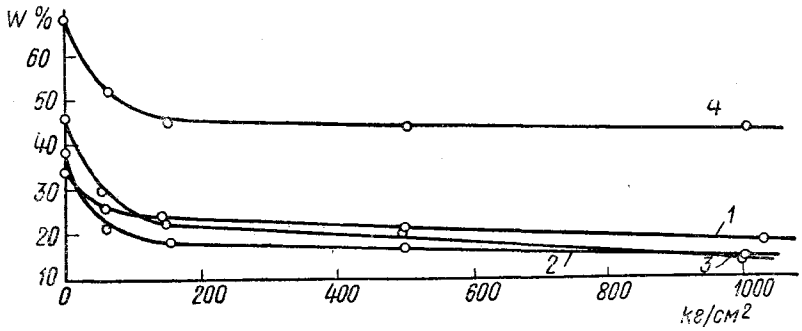


Рис. 12. Кривые, характеризующие изменение влажности глин при нагрузках до 1000 *кг/см²* (третья группа опытов):
1 — маршалит (2471), *2* — глина кембрийская (1994), *3* — каолин (2507), *4* — бентонит (2508)

Таблица 6

Нагрузка, *кг/см²*	Влажность, %			
	маршалит	кембрийская глина	каолин	бентонит
0,0	28,9	33,8	41,5	62,2
60,0	20,9	16,7	25,7	46,2
150,0	19,1	13,3	18,1	39,8
500,0	16,7	12,9	15,9	38,4
1000,0	14,6	9,8	9,6	37,8
Отжато воды, %	50	71	77	39

Как следует из рис. 12 и табл. 6, процесс обезвоживания глин продолжается непрерывно при повышении нагрузки до 1000 *кг/см²*, превосходя влажность, соответствующую максимальной молекулярной влагоемкости глин. Все кривые, характеризующие изменение влажности глин, по мере увеличения уплотняющего их давления, постепенно асимптотически приближаются к оси абсцисс, как и при опытах с малыми нагрузками. Влияние минералогического состава и при этих опытах также наглядно выражено. Так, например, каолин и кембрийская глина значительный процент воды отдают сравнительно легко. Бентонит, наоборот, прочно удерживает влагу и при нагрузках до 1000 *кг/см²* отдает влаги не более чем при малых нагрузках, хотя опыты с ним повторялись несколько раз.

Результаты всех опытов представлены на рис. 13 и сведены в табл. 7.

Таблица 7 и рис. 13 свидетельствуют о том, что результаты опытов по выжиманию воды из маршалита, кембрийской глины и каолина при малых и больших нагрузках хорошо сочетаются и действительно подтверждают, что обезвоживание их в пределах нагрузок до 1000 *кг/см²* происходит постепенно и непрерывно.

Таблица 7

Нагрузка, кг/см²	Влажность, %							
	маршалит		кембрийская глина		каолин		бентонит	
0,0	22,3	27,3	39,5	31,1	52,4	40,5	59,6	58,3
1,0	22,2	26,9	36,9	28,4	46,1	39,2	59,0	56,7
5,0	22,0	25,9	28,9	23,8	41,2	34,8	54,2	50,5
10,0	21,9	25,4	25,9	22,3	37,7	33,5	50,2	44,7
20,0	21,5	24,9	22,7	19,2	34,1	31,2	45,1	39,0
30,0	21,1	24,6	20,4	18,1	31,7	29,8	42,5	36,1
40,0	20,7	24,5	19,6	17,1	29,9	28,6	40,5	33,6
50,0	20,3	24,3	17,5	16,7	28,6	27,7	38,5	32,1
60,0	19,9	24,1	16,9	16,2	27,3	26,5	36,5	31,5
60,0	20,9		16,7		25,7		46,2	
150,0	19,1		13,3		18,1		39,8	
500,0	16,7		12,9		15,9		38,4	
1000,0	14,6		9,8		9,6		37,8	

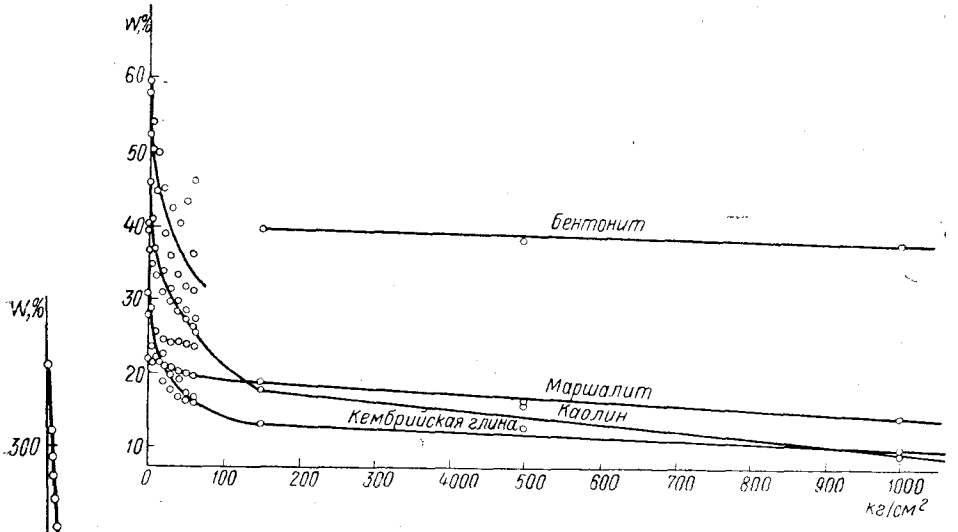


Рис. 13. Сводные графики, характеризующие изменение влажности глин при нагрузках до 1000 кг/см²

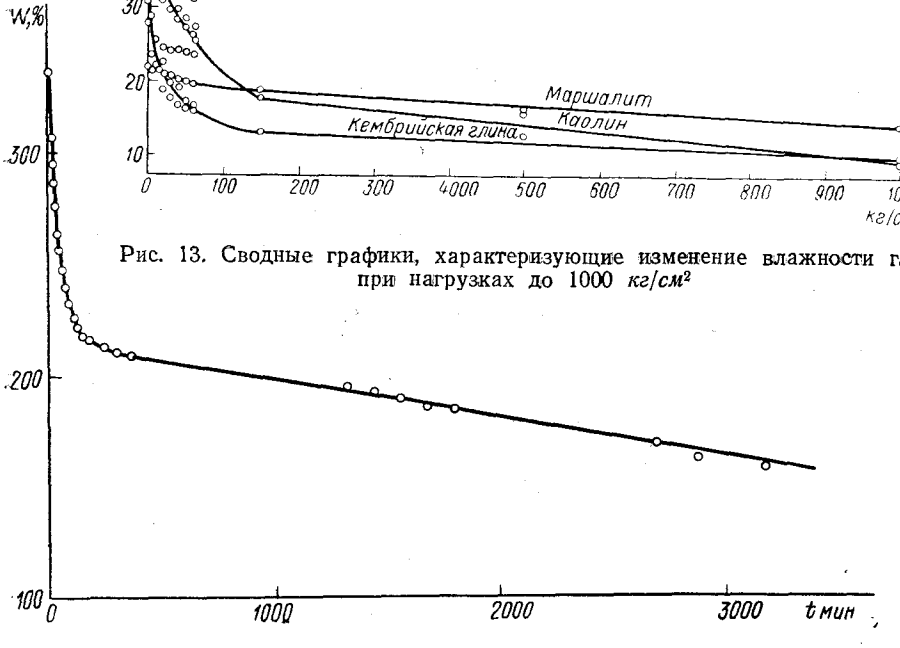


Рис. 14. График, характеризующий изменение влажности кембрийской глины во времени. (Результаты испытания глины по методу коротких колонн В. П. Попова)

Сводная таблица показывает, что опыты с бентонитом при малых и больших нагрузках не сочетаются. Для отжатия воды из бентонита, его, повидимому, необходимо выдерживать под нагрузкой значительно большее время, чем другие разности глин.

Для суждения о подвижности воды в глине была сделана попытка применения метода коротких колонн. В. П. Попова. Для этой цели кембрийская глина в состоянии, близком к текучему, загружалась в колонну, высотой 4 *см*, на половину ее высоты. После загрузки глины в колонну производилось отсасывание воды из глины фильтровальной бумагой (30—35 листов). Для достижения лучшего контакта между глиной и фильтровальной бумагой глина пригружалась нагрузкой 10 *кг/см*². Отдача воды глиной хронометрировалась путем взвешивания колонки через определенные промежутки времени. Результаты одного из таких опытов изображены на рис. 14, на котором видно, что наиболее подвижная часть влаги из глины была отделена в короткий промежуток времени, малоподвижную часть влаги глина теряла медленно.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ ПО ВЫЖИМАНИЮ НЕФТИ ИЗ ГЛИН

По выжиманию нефти из глин было произведено две группы опытов. Первая группа (по порядку четвертая) выполнялась при нагрузках до 60 *кг/см*², вторая группа (по порядку пятая) — при нагрузках до

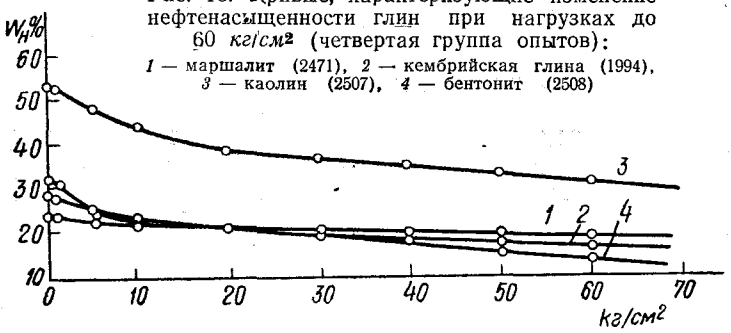


Рис. 15. Кривые, характеризующие изменение нефтенасыщенности глин при нагрузках до 60 *кг/см*² (четвертая группа опытов):
1 — маршалит (2471), *2* — кембрийская глина (1994), *3* — каолин (2507), *4* — бентонит (2508)

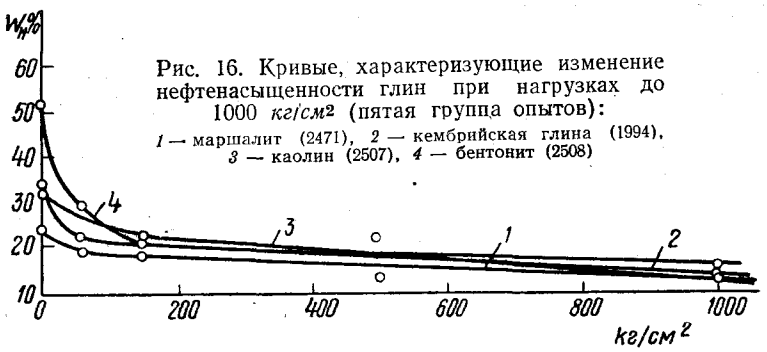


Рис. 16. Кривые, характеризующие изменение нефтенасыщенности глин при нагрузках до 1000 *кг/см*² (пятая группа опытов):
1 — маршалит (2471), *2* — кембрийская глина (1994), *3* — каолин (2507), *4* — бентонит (2508)

1000 *кг/см*². Глина, растертая для опытов в порошок, при воздушно-сухом состоянии, замешивалась с нефтью. [1]

Грунтовая масса при консистенции, близкой к текучему состоянию, загружалась в прибор. Нефтенасыщенность глины определялась по из-

[1] Нефть для опытов выдана Нефтяным институтом.

менению ее веса при смешивании с нефтью и выражалась в процентах по отношению к весу сухой породы.

Результаты опытов с нефтью изображены на рис. 15, 16 и сведены в табл. 8.

Таблица 8

Нагрузка, *кг/см²*	Нефтенасыщенность, %			
	маршалит	кембрийская глина	каолин	бентонит
	Четвертая группа опытов			
0,0	24,0	29,2	52,4	32,3
1,0	23,9	29,0	52,3	31,1
5,0	22,7	26,6	47,7	24,6
10,0	21,7	24,4	43,4	23,1
20,0	21,1	21,5	38,7	21,3
30,0	20,4	19,8	36,1	18,6
40,0	19,9	18,7	34,1	16,8
50,0	19,4	17,8	32,1	15,1
60,0	19,1	16,9	30,6	13,6
	Пятая группа опытов			
0,0	24,0	29,2	52,4	32,2
60,0	19,3	17,1	29,6	15,9
150,0	18,8	16,3	21,7	22,9
500,0	13,9	7,8	22,6	21,5
1000,0	12,5	9,1	15,3	10,2

Как представлено на рис. 15 и 16 и табл. 8, процент начальной нефтенасыщенности маршалита и каолина оказался равным проценту начальной влажности этих пород при приготовлении их грунтовой массы с водой. Кембрийская глина и бентонит имели начальную нефтенасыщенность значительно большую, чем была их начальная влажность при испытании с водой. Бентонит при приготовлении грунтовой массы очень плохо смешивался с нефтью.

На рис. 15 и 16 наглядно видно, что из всех испытанных разностей пород нефть отжимается легко, а из бентонита даже значительно легче, чем вода.

Все кривые, характеризующие изменение нефтенасыщенности пород при увеличении нагрузки, имеют, примерно, аналогичный характер с кривыми, характеризующими изменение влажности. Конечный процент нефтенасыщенности всех разностей пород, за исключением каолина, оказался ниже конечного процента влажности при испытании их с водой. Все кривые, по мере увеличения нагрузки, постепенно асимптотически приближаются к оси абсцисс. При опытах с нефтью влияние минералогического состава выражено также наглядно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучение условий выжимания воды и нефти из глин имеет исключительно важное значение для понимания генезиса нефти, нефтяных месторождений, формирования солевого состава подземных вод и свойств глинистых осадков.

2. Характернейшей особенностью глинистых пород, отличающей их от всех иных отложений, являются 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, исключаемой на геологически длительные сроки из пределов гидросферы.

3. Характерным признаком большинства глинистых и илистых осадков является также высокое содержание в них органических остатков, которые при соответствующих условиях в результате распада дают новые образования, в том числе и жидкие углеводороды. При этом одним из важнейших геологических факторов, способствующих превращениям органических остатков в битум, является давление.

4. Огромные запасы влаги, аккумулирующиеся в глинистых породах, в той или иной мере могут быть удалены из этих пород лишь при существенном изменении условий их существования, вызываемом увеличением давления или появлением возможности испарения влаги. При выжимании воды из горных пород происходит выжимание и жидких углеводородов.

5. Проведенные экспериментальные работы, как и литературные данные, показывают, что процесс обезвоживания глинистых пород под влиянием нагрузки является естественным явлением. Все кривые уплотнения глин по мере увеличения нагрузки постепенно асимптотически приближаются к оси абсцисс. При этом, как показывают опыты, процесс обезвоживания глин продолжается непрерывно до нагрузки 1000 *кг/см*^{2}, превосходя влажность, соответствующую максимальной молекулярной влагоемкости глин. Аналогичный вид имеют и кривые, показывающие изменение нефтенасыщенности глин при уплотнении.

6. Кривые уплотнения глин показывают, что процесс уплотнения глин при этом, повидимому, проходит через ряд стадий: стадию более или менее свободного уплотнения, стадию затрудненного уплотнения и стадию замедленной или полной консолидации.

Соответственно трем стадиям уплотнения, повидимому, происходит и выделение воды из глин — свободной (легкоподвижной), капиллярной (подвижной) и рыхло-связанной (малоподвижной).

7. Проведенные экспериментальные работы свидетельствуют о том, что метод влагоемких сред для определения максимальной молекулярной влагоемкости горных пород предложен А. Ф. Лебедевым ошибочно. Этот метод совершенно не характеризует максимальную молекулярную влагоемкость, как «влажность породы, соответствующую максимальной толщине пленки», облекающей частицы породы. Новейшие данные показывают, что отжиматься может не только свободная вода, но, повидимому, и часть воды рыхло-связанной.

При умеренной или незначительной влажности глинистой породы, при наличии в ней дискретной капиллярной воды в местах стыка частиц породы менисковые силы могут быть больше, чем сорбционные, поэтому рыхло-связанная вода стягивается с поверхности частиц породы, сольватный слой утоньшается. Рыхло-связанная вода сливается с водой дискретной — капиллярной. Вот почему понятие «влажность

породы, соответствующая максимальной толщине пленки», является не определенным.

8. Скорость уплотнения и обезвоживания глин различна в зависи мости от их состава (гранулометрического, минералогического и соста ва поглощенных оснований), состояния и генезиса. Скорость обезвожи вания глин зависит также от начальной степени их влажности, от со става и степени минерализации воды их насыщающей. В природных ус ловиях процесс уплотнения и обезвоживания глин усложняется рядо других физико-химических факторов, сопровождающихся цементацие пород и др.

9. Литературные данные и проведенные экспериментальные работ показывают, что при серьезной постановке вопроса о генезисе нефти нефтяных месторождений необходимо продолжать научные исследова ния по условиям выжимания воды и нефти из глин.

Имеющиеся сведения об условиях выжимания воды и нефти и глин следует рассматривать только как предварительные и неполны но открывающие широкие перспективы для понимания многих геологи ческих явлений.

10. Работы по условиям выжимания воды и нефти из глин сле дует продолжать в направлении изучения влияния на этот процес больших нагрузок, начальной влажности и нефтенасыщенности поро вещественного состава, состава и степени минерализации воды и соста ва нефти. Необходимо получить представление о направлении измен ений, претерпеваемых породой, водой и нефтью при процессах их выж мания и т. д. Как видно из изложенного, перечень вопросов, подлежащи выяснению и связанных с названной темой, значителен.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. И. Андрианов, Связанная вода почв и грунтов, Труды Института мер лотоведения им. В. А. Обручева, 1946, т. III.
2. И. И. Антипов-Каратаев и Г. М. Кадер, О природе поглощен ионов глинами и почвами. II. Поглощение одновалентных и двухвалентных к тионов бентонитовой глиной и натролитом, Коллоидный журнал, 1947, т. I № 2.
3. И. И. Антипов-Каратаев и Г. М. Кадер, О природе поглощен ионов глинами и почвами. II. Поглощение одновалентных и двухвалентн катионов каолиновой глиной. Коллоидный журнал, 1947, т. IX, № 3.
4. И. И. Антипов-Каратаев, Г. М. Кадер и В. Н. Филиппова, О пр роде поглощения ионов глинами и почвами. III. Поглощение одновалентных двухвалентных катионов черноземной почвой и гуминовой кислотой, Коллои ный журнал, 1947, т. IX, № 5.
5. И. И. Антипов-Каратаев, Г. М. Кадер и В. Н. Филиппова, природе поглощения ионов глинами и почвами. IV. Поглощение двухвалентн катионов краснобурыми глинами и некоторыми почвами, Коллоидный журн 1948, т. X, № 2.
6. А. К. Бунеев, К истории вод седиментации, Советская геология, 1947, №
7. А. К. Бунеев, П. А. Крюков и Е. В. Ренгартен, Опыт отжимания ра творов из осадочных горных пород, Доклады АН СССР, 1946, т. 57, № 7.
8. Л. Н. Барсуков, Почвы и коллоидная система, Почвоведение, 1948, № 4
9. Ф. М. Ван-Тайл, В. Г. Паркер и У. У. Скитерс, Миграция и аккуму ция нефти и природного газа, 1948.
10. И. В. Вершинин, Б. В. Дерягин и И. В. Кириленко, О незамерза щей воде в почве, Известия АН СССР, серия географическая и геофизическ 1949, № 2.
11. А. Б. Вистелиус, Ритмы пористости и явления фазовой диференциа осадочных пород АН СССР, 1946, т. IV, № 6.

12. И. М. Губкин, Учение о нефти, ОНТИ, 1937.
13. В. Гаузер и Д. Лево, Коллоидная химия глинистых пленок, Сборник физико-химия глинистых растворов, 1947.
14. Гринн и Р. Уэлтмэн, Тиксотропия, Сборник физико-химия глинистых растворов, 1947.
15. Н. Я. Денисов и П. А. Ребиндер, О коллоидально-химической природе связности глинистых пород, Доклады АН СССР, 1948, т. IV, № 6.
16. Н. Я. Денисов, К теории деформаций глинистых пород, Доклады АН СССР, 1948, т. 59, № 2.
17. Н. Я. Денисов, О гидрогеологическом значении процессов адсорбции влаги глинистыми породами, Доклады АН СССР, Новая серия, 1947, т. 58, № 7.
18. Б. Дерягин, Упругие свойства тонких слоев воды, Физическая химия, 1934, т. III, вып. I.
19. Б. В. Дерягин и М. М. Кусаков, Определение зависимости расклинивающего давления от толщины гидратных пленок воды на минеральных частицах, Современные методы исследования физико-химических свойств почв, АН СССР, 1948, т. IV, вып. 3.
20. С. И. Долгов, О формах и состояниях почвенной влаги, Почвоведение, 1946, № 7.
21. С. И. Долгов, Исследования подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений, АН СССР, 1948.
22. С. И. Долгов, О связанной и капиллярной воде в почве, Почвоведение, 1943, № 9—10.
23. А. В. Думанский, Гидрофильность коллоидов и связная вода, Современные проблемы физико-химической и химической технологии, сборник II, 1938.
24. А. Думанский и А. Думанская, Связная вода в почвах, Известия Научно-исследовательского института коллоидной химии, 1934.
25. Н. А. Качинский, О влажности почвы и методах ее изучения, Сельхозгиз, 1930.
26. Н. А. Качинский, О структуре почвы, некоторых водных ее свойствах и диференциальной порозности, Почвоведение, 1947, № 6.
27. П. А. Крюков, Методы выделения почвенных растворов, Современные методы исследования физико-химических свойств почв, АН СССР, 1947, том. IV, вып. 2.
28. П. А. Крюков, Методы определения связной воды в почвах, Современные методы исследований физико-химических свойств почв, АН СССР, 1948, том. IV, вып. 3.
29. П. И. Колосков, Сорбция, как один из источников почвенно-грунтовой воды, Проблемы физической географии, 1938.
30. П. И. Колосков, Пересмотр некоторых выводов и положений книги А. Ф. Лебедева «Почвенные и грунтовые воды», Проблемы физической географии, 1939.
31. А. Ф. Лебедев, Почвенные и грунтовые воды, изд. 4-е, АН СССР, 1936.
32. А. Ф. Лебедев, Определение максимальной молекулярной влагоемкости посредством центрофугирования и характеристики механического состава почв посредством максимальной молекулярной влагоемкости, Почвоведение, 1927, № 4.
33. М. А. Мессинева, Современные взгляды на происхождение нефти, Сборник Происхождение нефти и природных газов, 1947.
34. В. А. Приклонский, О роли вторичных глинистых минералов в формировании подземных вод коры выветривания, Сборник рефератов АН СССР, 1946.
35. В. К. Попов, Категории воды в почвах и грунтах, Обзор литературы, Научные записки Киевского университета им. Шевченко, 1948, т. VII, вып. 8.
36. В. К. Попов, Почвенная влага и методы ее изучения, Киев, 1928.
37. А. Б. Ронов, История осадконакопления и колебательных движений Европейской части СССР, АН СССР, 1949.
38. В. А. Соколов, Очерки генезиса нефти, 1949.
39. А. В. Трофимов, О пленочной влаге в почве, Научно-агрономический журнал, 1927, № 8.