

Геологическая деятельность подземных вод

Отрасль геологии, предметом которой является изучение подземных вод и условий их образования, называется гидрогеологией.

Формы существования воды в горных породах

Интенсивная деятельность подземных вод определяется, прежде всего, их огромной массой. По оценке В. И. Вернадского, масса подземных вод достигает 5×10^{17} т, что немногим меньше общей массы Мирового океана ($1,5 \times 10^{18}$ т). Практически в пустотах и трещинах земной коры содержится огромный подземный океан, превышающий по массе воды, например, Атлантический океан.

Вода, заполняющая различные пустоты горных пород (каверны, трещины, поры), в зависимости от давления и температуры может находиться в парообразной, жидкой или твердой (в виде льда) фазах.

К парообразной фазе относят водяные пары, которые вместе с воздухом заполняют поры, каверны и трещины горных пород. При понижении температуры или повышении давления водяные пары конденсируются на стенках пустот горных пород и переходят в жидкую фазу.

Подземную воду, находящуюся в горных породах в жидкой фазе, подразделяют на гигроскопическую, пленочную, капиллярную и гравитационную.

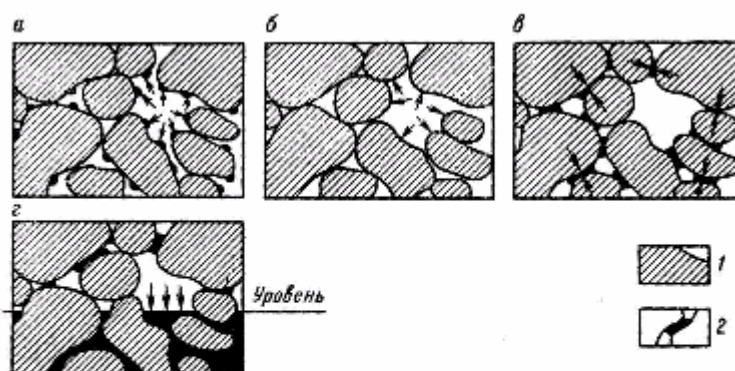


Рис. 21. Формы нахождения воды в пустотах горных пород: а – гигроскопическая, б – пленочная, в – капиллярная, г – гравитационная, 1 – зерна породы, 2 – вода

Гигроскопическая вода

в виде сплошной одномолекулярной пленки или отдельных мельчайших

капелек покрывает стенки пустот (рис. 21, *а*). Она настолько прочно связана с частицами породы, что не способна передвигаться в пустотах породы под влиянием силы тяжести. Выделить гигроскопическую воду из породы можно только путем нагревания последней до температуры более 100°C, при которой вода переходит в парообразную фазу.

С увеличением количества воды в пустотах породы возникает пленочная вода, образующая на поверхности минеральных частиц сплошную пленку из нескольких слоев молекул (рис. 21, *б*). Толщина такой пленки может быть различной. Пленочная вода способна передвигаться от частиц с большей толщиной пленки к частицам с меньшей ее толщиной. Движение воды на стенках пустот происходит до тех пор, пока толщина пленок не станет равной, причем пленочная вода движется в различных направлениях, не испытывая влияния силы тяжести.

При еще большем содержании воды в породах образуется капиллярная вода, заполняющая мелкие пустоты и микротрещины, в которых она удерживается силами поверхностного натяжения (рис. 21, *в*). Капиллярная вода может продвигаться по капиллярным каналам в любом направлении, в том числе и снизу вверх, т. е. в направлении, противоположном действию силы тяжести. Продвигается она обычно тем дальше, чем тоньше диаметр пор или трещин, по которым она движется.

Гравитационная вода находится в капельно-жидком состоянии в проницаемых породах, передает гидростатическое давление и передвигается под действием гравитационных сил (рис. 21, *г*). Сила тяжести обуславливает наличие у гравитационной воды уровня, или зеркала.

Для геологов-нефтяников наибольший интерес представляет гравитационная вода, содержащаяся в породах и способная перемещаться по пустотам пластов.

Кроме перечисленных в природе существуют также воды, химически связанные с горными породами, участвующие в строении кристаллической

решетки минералов. К ним относятся конституционная, кристаллизационная и гидратная воды.

Коллекторские свойства горных пород

Содержание и накопление воды в породе зависит от ее коллекторских свойств, т. е. от способности вмещать и пропускать через себя воду и любую другую жидкость или газ.

Емкостная способность пород, т. е. способность вмещать жидкость или газ, определяется их пористостью. Пористостью m называется отношение суммарного объема пор $V_{\text{п}}$ к общему объему породы $V_{\text{общ}}$, выраженное в процентах: $m = (V_{\text{п}}/V_{\text{общ}})'100$. Пористость обломочных пород зависит от их гранулометрического состава, под которым понимают размеры и форму слагающих породу частиц. Пористость осадочных пород, особенно песков и алевритов, тем выше, чем более однородны по размеру и лучше окатаны отдельные песчинки. И наоборот, чем разнообразнее по размеру частицы, слагающие породу, и чем меньше они окатаны, тем меньше пористость породы.

Происхождение порового пространства в породе определяется особенностями ее формирования и последующего развития (рис. 22). В зависимости от этих процессов различают поры первичные и вторичные.

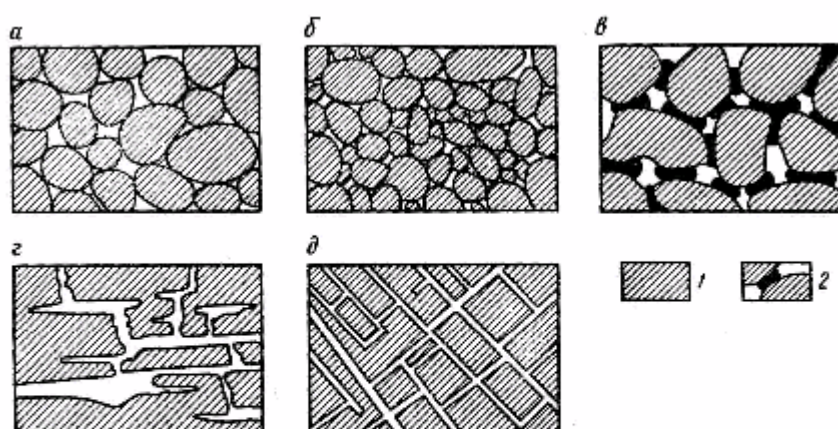


Рис. 22 Типы пустотного пространства.

*Межзерновое пустотное пространство (поры) в коллекторах
а — хорошо отсортированных, б — плохо отсортированных,
в — с цементующим материалом; г — пустоты выщелачивания;
д — трещины. 1 — порода; 2 — цемент*

Первичные поры формируются в процессе образования породы. К ним относятся поры:

межзерновые — между обломками в осадочной породе; межкристаллические — по плоскостям спайности; биогенного происхождения — образовавшиеся после распада органического вещества; межслоевые — между плоскостями напластования осадочных пород.

Вторичные поры образуются в результате воздействия на породу различных факторов. Среди вторичных пор различают: трещинные, возникшие в результате дробления плотных пород при тектонических движениях; эрозионные, образовавшиеся под действием экзогенных процессов выветривания; выщелачивания, возникающие при растворении и уносе растворимых минералов потоками подземных вод.

Различные породы обладают пористостью 20—30 % и более. Пористость хорошо отсортированных песков может составлять 15—20 %, а некоторых разновидностей сухой глины даже 50—60 %. Однако опыт показывает, что далеко не все породы, обладающие пористостью, могут пропускать через себя жидкость или газ. И действительно, величина пористости никак не отражает характер соединения пор между собой, а следовательно, и фильтрационную способность породы. Это свойство горных пород характеризуется проницаемостью.

За единицу проницаемости в Международной системе единиц принимается проницаемость пористой породы, при фильтрации через образец которой площадью 1 м^2 и длиной 1 м при перепаде давления 1 Па расход жидкости вязкостью 1 Па·с составляет $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Физический смысл размерности заключается в том, что проницаемость характеризует площадь сечения каналов пустотного пространства, по которым происходит фильтрация.

Между пористостью и проницаемостью существует довольно сложная зависимость, однако проницаемость породы определяется не только объемом пустотного пространства, но и формой, размерами пор и трещин, характером их соединения между собой. Этим можно объяснить тот факт, что не всегда значительная пористость обеспечивает высокую проницаемость породы.

Например, глины нередко имеют пористость не меньшую, а даже большую (до 50—60 %), чем крупнозернистые пески (до 30 %), а оказываются практически непроницаемыми. Обусловлено это тем, что размеры пор у глины настолько малы, что большая часть влаги находится в них в капиллярном состоянии, т. е. не способна свободно перемещаться по пласту.

Все горные породы в той или иной степени способны пропускать воду, однако степень проницаемости их различна. По степени проницаемости горные породы подразделяются на три группы. К первой относятся проницаемые породы, через которые вода фильтруется наиболее легко. Это — пески, гравий, галечники, трещиноватые разности других пород. Вторая группа объединяет полупроницаемые породы — супеси, лёсс, неразложившийся торф и др. К третьей группе относятся практически непроницаемые породы — глины, плотные глинистые сланцы, аргиллиты, сцементированные осадочные породы, нетрещиноватые разности магматических и метаморфических пород, а также породы, находящиеся в зоне многолетней мерзлоты. Породы первой и второй групп слагают пласты-коллекторы, породы третьей группы образуют пласты-водоупоры.

Происхождение и состав подземных вод

Подземные воды по происхождению подразделяются на следующие типы: инфильтрационные, конденсационные, седиментационные (или реликтовые), магматогенные (ювенильные).

Инфильтрационные воды. Образуются в результате просачивания (инфильтрации) атмосферных осадков или вод рек и озер по порам и трещинам горных пород. Общий объем воды, выпадающей на поверхность Земли в течение года, оценивается в 108,4 тыс. км³. Из них более двух третей (71,1 тыс. км³) испаряется, т. е. возвращается в атмосферу, а одна треть (37,3 тыс. км³) формирует поверхностный сток; часть этого стока, расходуемая на увлажнение почв, проникает в пласты-коллекторы, образуя инфильтрационные воды.

Конденсационные воды. Их происхождение объясняют конденсацией атмосферной влаги в порах и трещинах пород в условиях резких суточных колебаний температуры пустынь.

Седиментационные (реликтовые) воды. Образуются за счет захоронения вод древних бассейнов совместно с накопившимися в них осадками. Большая часть осадочных горных пород образовалась из осадков, которые формировались в водной среде. Воды этих древних морских или озерных водоемов могли сохраниться в осадках и в сформировавшихся из них породах или просочиться в окружающие породы. В том и другом случае такие подземные воды относят к седиментационным, или реликтовым. В зависимости от того, остались реликтовые воды на месте или переместились в другие толщи, их подразделяют на две разновидности. К первой относят так называемые сингенетичные подземные воды, которые были захоронены одновременно с заключающим их осадком. Они составляют только одну часть захороненных совместно с осадком вод. Другая их часть при уплотнении осадка отжимается в перекрывающие или подстилающие толщи. Эти подземные воды называют эпигенетичными.

Магматогенные (ювенильные) подземные воды. Поступают они из глубинных недр земной коры, их происхождение связано с остыванием расплавленной магмы.

Подземные воды, как правило, содержат растворенные соли. Суммарное их количество в единице объема называют общей минерализацией вод. Насыщение подземных вод различными солями происходит в процессе сложного взаимодействия подземных вод и горных пород, по которым они движутся. Подземные воды, растворяя легкорастворимые соединения, переносят их на большие расстояния и при определенных условиях могут осаждают в виде минералов в пустотах горных пород или у выходов подземных вод на поверхность.

Подземные воды, как правило, содержат растворенные соли. Суммарное их количество в единице объема называют общей

минерализацией вод. Насыщение подземных вод различными солями происходит в процессе сложного взаимодействия подземных вод и горных пород, по которым они движутся. Подземные воды, растворяя легкорастворимые соединения, переносят их на большие расстояния и при определенных условиях могут осаждать в виде минералов в пустотах горных пород или у выходов подземных вод на поверхность.

Крупнейший советский геохимик В. И. Вернадский подразделил все природные воды по степени их минерализации на пресные, солоноватые, соленые и рассолы. Согласно этой классификации пресные воды содержат меньше 1 г/л растворенных солей; солоноватые — 1—10 г/л; соленые — 10—50 г/л; рассолы — более 50 г/л.

Помимо количественных показателей при классификации подземных вод используют данные о химическом составе растворенных в них солей. Подземные воды классифицируют по химическому составу на основании преобладающих анионов и катионов. Наиболее распространенными классами вод, выделенными по преобладающим анионам, являются: гидрокарбонатные ($\text{HCO}_3^- > 25$ %-экв), сульфатные ($\text{SO}_4^{2-} > 25$ %-экв), хлоридные ($\text{Cl}^- > 25$ %-экв), сложного состава (сульфатные гидрокарбонатные, хлоридные гидрокарбонатные и т. д.).

Если при классификации вод используют данные о составе солей, то выделяют воды гидрокарбонатные кальциевые, гидрокарбонатные магниевые, сульфатные кальциевые, хлоридные кальциевые и т. д. Таким образом, при полной характеристике подземных вод указывают их класс по степени общей минерализации и тип по составу преобладающих анионов и катионов. Например, характеризуя воды глубокозалегающих водоносных горизонтов европейской части СССР, отмечают, что они представлены рассолами с общей минерализацией 270—350 г/л, хлоридными натриевыми и хлоридными натриево-кальциевыми по составу.

В верхних слоях земной коры в общем случае устанавливается четко выраженная вертикальная гидрохимическая зональность: сверху вниз

располагаются зоны гидрокарбонатных, сульфатных и, наконец, хлоридных вод.

Условия залегания подземных вод

По условиям залегания обычно выделяют следующие типы подземных вод:

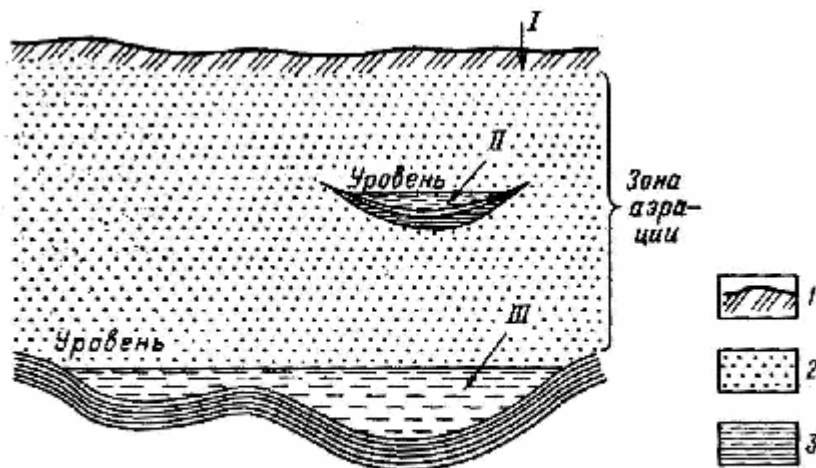


Рис. 23. Схема залегания почвенной воды (I), верховодки (II) и грунтовой воды (III). 1 - почва, 2 - пески, 3 - глины

Воды верховодки.

Верховодкой называется подземная вода, залегающая на небольшой глубине в зоне аэрации — зоне свободного проникновения воздуха. Обычно верховодка не имеет сплошного распространения, а образует сравнительно небольшие линзы, которые подстилаются водоупорными породами (рис. 23). Мощность таких линз верховодки обычно не превышает 0,5—1 м, реже достигает 2—3 м. Здесь вода находится уже в гравитационной форме и обладает уровнем. Уровень воды верховодки подвержен значительным колебаниям, чем и объясняется ее исчезновение в колодцах в районах с засушливым климатом.

Грунтовые воды. Атмосферные воды, просачиваясь сверху вниз до водоупора, а затем перемещаясь в горизонтальном направлении, постепенно заполняют все пустоты горной породы. Так возникают водоносные горизонты (рис. 23).

Водоносным горизонтом называется пласт или слой породы, в котором поры, пустоты и трещины заполнены водой. У каждого такого пласта

имеются кровля и подошва. Если пласт не полностью заполнен водой, то под водоносным горизонтом понимают лишь его водонасыщенную часть. *Первый от земной поверхности постоянный водоносный горизонт называется горизонтом грунтовых вод.* Грунтовые воды обладают свободной поверхностью — зеркалом, или *уровнем грунтовых вод*. Этот уровень непостоянен. Обычно он повышается в дождливые и понижается в засушливые периоды. Если уровень грунтовых вод на каком-то участке поднимается до земной поверхности, то здесь образуется болото.

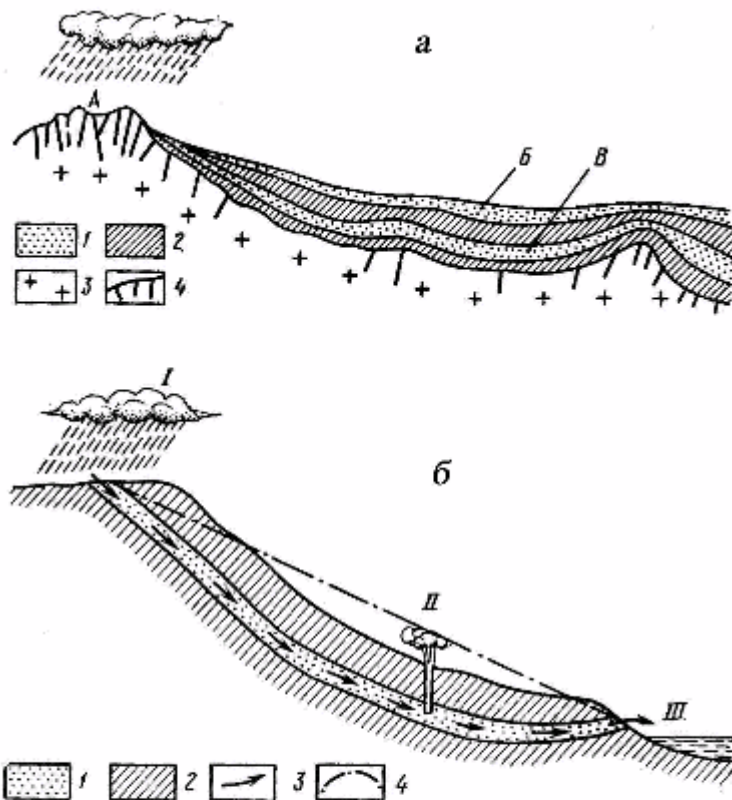


Рис. 24 Гидрогеологические бассейны: а — трещинных и пластовых вод (А — трещинных и жально-трещинных вод; Б — почвенных вод; В — пластовых вод. Породы: 1 — коллекторы, 2 — водоупоры, 3 — магматические, 4 — система трещин в магматических породах); б — межпластовых вод (I — питания; II — напора; III — разгрузки. Породы: 1 — пласт-коллектор, 2 — глинистые пласты, 3 — направление движения в коллекторе, 4 — пьезометрическая поверхность)

В целом грунтовые воды характеризуются наличием свободной водной поверхности — уровня, наличием только одного, подстилающего, водоупора и отсутствием напора.

Межпластовые (пластовые) воды. Отличие межпластовых вод состоит прежде всего в том, что они заключены между двумя водоупорами, т. е. ограничены ими и сверху (со стороны кровли) и снизу (со стороны подошвы). Водоносные горизонты, содержащие межпластовые воды, обычно характеризуются обширной областью распространения, часто измеряемой тысячами квадратных километров. При этом они залегают на значительной глубине, выходя на поверхность лишь на периферии.

Подземные воды вместе с вмещающими их породами образуют *гидродинамические системы*, которые делятся на безнапорные и напорные.

Безнапорные гидродинамические системы обычно характерны для бассейнов грунтовых вод, не обладающих естественным напором.

В пределах *напорных* систем атмосферные воды попадают в проницаемый пласт в районах, где он обнажается на поверхности, в так называемой области питания. Постепенно атмосферная влага проникает вглубь и полностью насыщает весь пласт. Перемещаясь по пласту, вода достигает других участков выхода его на поверхность и самоизливается, образуя источники подземных вод. Это *область разгрузки*, или *дренажа* пластовых вод. В зависимости от рельефа и высотного положения областей питания и разгрузки в центральной, наиболее прогнутой части бассейна могут существовать условия, благоприятные для создания напора, т.е. самопроизвольного излияния воды под давлением (рис. 24,а).

Таким образом, в центральной части бассейна образуется область напора, в пределах которой вода из скважин способна изливаться в виде фонтана. Высота подъема воды зависит от расположения скважин относительно областей питания и дренажа и от гидростатического уровня.

Гидростатическим (пьезометрическим) уровнем называется воображаемая поверхность, проходящая через область питания и разгрузки и определяющая высоту подъема воды в данном месте (рис. 24). Пьезометрический уровень обычно выражается в абсолютных отметках по

отношению к уровню моря. Выше этого уровня артезианская вода при фонтанировании подняться не может.

Другой характеристикой области напора является гидростатический (пьезометрический) напор, под которым понимают высоту столба воды от кровли водоносного горизонта до пьезометрического уровня. Пьезометрический напор выражается в метрах.

Воды нефтяных и газовых месторождений

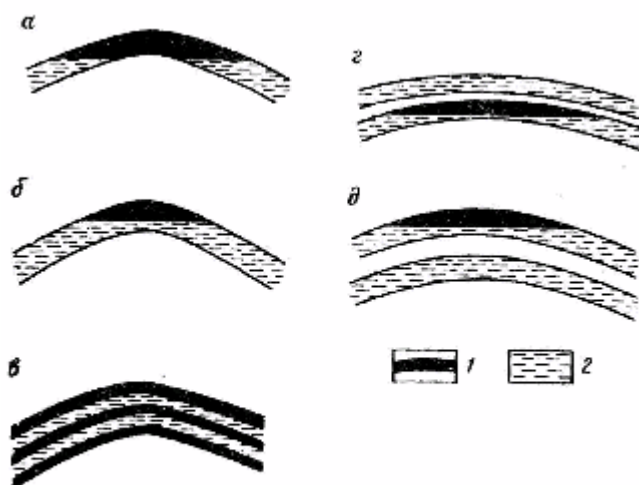


Рис. 25. Схемы залегания пластовых вод нефтяных и газовых месторождений.

1 – нефть; 2 – вода

Пластовые воды нефтяных и газовых месторождений, согласно классификации М. А. Жданова и др. (1966 г.), подразделяются по отношению к залежи нефти или нефтеносному пласту на несколько разновидностей: нижняя краевая вода располагается в пониженных частях нефтяного пласта, подпирает нефтеносную залежь (рис. 25, а); подошвенная — в нижней, подошвенной, части нефтяного пласта в пределах всей структуры, включая ее сводовую часть (рис. 25, б); промежуточная вода приурочена к водоносным пластам или пропласткам в нефтяном пласте, являющимся единым объектом разработки (рис. 25, в); верхняя — к чисто водоносным пластам, залегающим выше нефтяной залежи (рис. 25, з); нижняя — к чисто водоносным пластам, залегающим ниже нефтяной залежи (рис. 25, д).

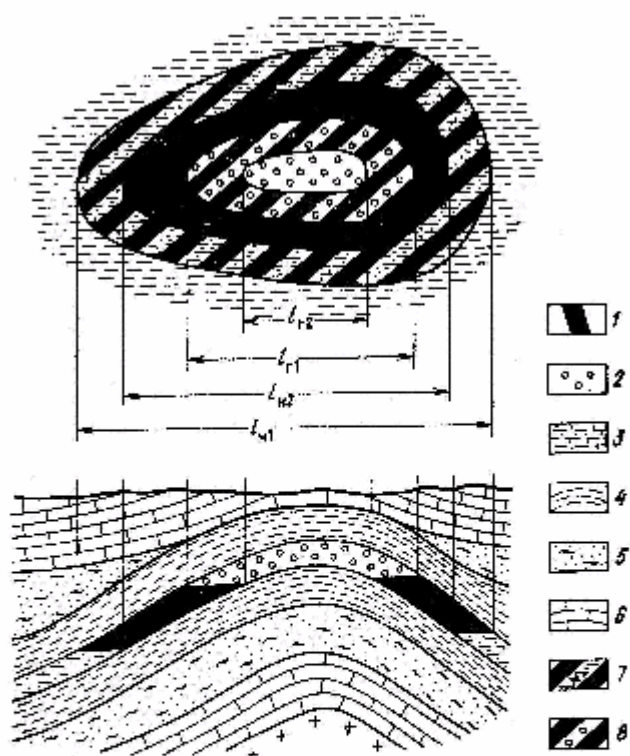


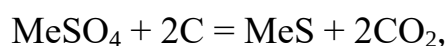
Рис. 26 Положение контуров газоносности и нефтеносности. Части пласта: 1 — нефтенасыщенная; 2 — газонасыщенная; 3 — водонасыщенная; 4 — глины; 5 — алевроиты; 6 — известняки; зоны: 7 — водонефтяного контакта, 8 — газонефтяного контакта; l_{n1}, l_{n2} — внешний и внутренний контуры нефтеносности; l_{r1}, l_{r2} — то же, газоносности.

На нефтяных и газовых месторождениях нефть и газ залегают совместно с подземными водами. При этом происходит их естественная сепарация по плотности: самое высокое положение занимает газ, ниже залегает нефтенасыщенная часть пласта, а еще ниже — водонасыщенная. Эти участки пласта условно отделяются друг от друга поверхностями газонефтяного (ГНК) и водонефтяного (ВНК) контактов. Указанная способность газа, нефти и воды к естественной сепарации является причиной того, что в естественных условиях нефть и газ обычно находятся в так называемых ловушках. Наиболее распространены ловушки структурного типа — выпуклые изгибы пластов, перекрытые непроницаемыми породами (рис. 26).

Наличие в нефтяных месторождениях изолированных газовых залежей и многообразие типов подземных вод обуславливают и различное положение

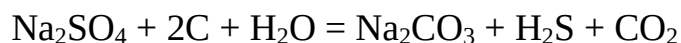
контактов между газом, нефтью и водой. В частности, для нижних краевых вод положение контакта нефть—вода определяется двумя контурами: внешним и внутренним (см. рис. 26). Внешний контур проводится по кровле нефтеносного пласта, а внутренний — по подошве. Часть пласта, расположенная между внутренним и внешним контурами нефтеносности, содержит вверху нефть, внизу воду и называется приконтурной зоной.

Геологи-нефтяники постоянно изучают подземные воды нефтяных и газовых месторождений, их динамический режим и химический состав. Следует отметить, что подземные воды указанных месторождений, как правило, характеризуются повышенной минерализацией. По составу эти воды обычно относятся к типу хлоридных кальциевых (хлоркальциевых), реже гидрокарбонатных натриевых. Они отличаются повышенным содержанием ионов йода, брома, часто в них присутствует сероводород. К характерным особенностям вод нефтяных месторождений относятся отсутствие или весьма малое содержание сульфатов и наличие солей нафтенных кислот. Присутствие углерода органического происхождения в подземных водах нефтяных месторождений создает восстановительную химическую обстановку, приводящую к восстановлению сульфатов по схеме

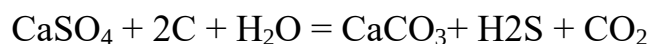


где Me — металлы, С — органический углерод (нефти, битума, газов).

В зависимости от металла реакция приводит к образованию различных соединений. Так, при восстановлении сульфата натрия



образуется растворимая в воде сода Na_2CO_3 , повышающая щелочность пластовых вод. При восстановлении сульфата кальция



образуется нерастворимый в воде кальцит CaCO_3 , выпадающий в осадок и ухудшающий коллекторские свойства пород в приконтурной зоне. Однако в любом случае выделяется сероводород, который впоследствии

реагирует с различными оксидами, образуя пирит, халькопирит и другие минералы группы сульфидов.

Процессу восстановления сульфатов — десульфатизации способствуют микроорганизмы — особые бактерии-десульфатизаторы, живущие в нефти. Среди них наиболее распространены *Vibrio desulfuricas* и *Vibrio thermodesulfuricas*.

Для установления общей минерализации пластовых вод определяют количество солей, растворенных в 1 л, т. е. массу сухого остатка, которая выражается в процентах по отношению к массе 1 л воды. Многочисленные анализы вод нефтяных и газовых месторождений показали, что их общая минерализация колеблется в довольно больших пределах. Например, в Грозненском районе она составляет 6,3 %, в районе Баку достигает 17 % и т. д.

В процессе разработки нефтяных месторождений положение контура нефть—вода меняется. Одной из задач разработки является обеспечение равномерного его продвижения. Дело в том, что пластовые воды с их напором играют роль источника энергии для вытеснения нефти из коллектора. Поэтому на начальной стадии эксплуатации месторождения скважины, вскрывшие нефтяную часть пласта, фонтанируют. По мере интенсивного отбора нефти давление в пласте постепенно падает, а контур нефть — вода перемещается к своду залежи. Для поддержания высокого давления в нефтяном пласте и продления наиболее экономичного фонтанного периода эксплуатации по периферии залежи (за контуром нефть — вода) бурят нагнетательные скважины, по которым в пласт закачивают воду, восстанавливая тем самым давление в пласте.

Изучение подземных вод нефтяных и газовых месторождений имеет не только теоретическое, но и большое практическое значение. Результаты этого изучения используются для правильной, оценки перспектив нефтегазоносности территорий. Благоприятными гидрохимическими показателями при этом служат низкое содержание в водах сульфатов и

повышенное карбонатов, а также повышенная концентрация йода, брома, сероводорода в водах хлоркальциевого типа и т.д. Если подземные воды исследуемого района характеризуются указанными особенностями, это позволяет предполагать наличие здесь нефтяных, газовых или газоконденсатных месторождений.

Вопросы:

- 1) Перечислите формы воды, присутствующей в горных породах.***
- 2) В чем выражаются коллекторские свойства горных пород?***
- 3) В каком генетическом типе содержится самый большой объем воды?***
- 4) Чем нефтяные коллектора отличаются от водоносных?***