

УДК 550.3;550.8

DOI: 10.31660/0445-0108-2023-1-45-59

Особенности уплотнения терригенных осадочных пород нефтегазоносных отложений

В. Г. Мамяшев*, А. М. Кузнецова

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**tmngeofiz@mail.ru*

Аннотация. Процесс уплотнения осадков определяет закономерности изменения свойств горных пород нефтегазоносных разрезов и, прежде всего, их пористости. Изучение закономерностей изменения пористости пород разной литологии от глубины их залегания представляет практическое значение для идентификации геологических разрезов, для обоснования интервалов существования коллекторов с межзерновым типом пористости, для прогнозирования свойств опорных пластов по разрезу и методического обеспечения геологической интерпретации материалов геофизических исследований скважин. Существующая концепция гравитационного уплотнения осадков не отражает ряда особенностей этого процесса пород в реальных условиях. В статье обоснованы условия формирования осадков, соответствующие переходу их в начальное, относительно стабильное состояние. Обоснованы особенности формирования осадков в начальных морских и континентальных условиях, а также особенности формирования их в условиях многолетнемерзлых толщ. Рассмотрены общие закономерности и особенности кривых уплотнения «чистых» песчаников и глин по данным опорных скважин, пробуренных в пределах Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна.

Ключевые слова: осадочные породы, нормальное уплотнение, пористость, «чистые» песчаники и глины

Для цитирования: Мамяшев, В. Г. Особенности уплотнения терригенных осадочных пород нефтегазоносных отложений / В. Г. Мамяшев, А. М. Кузнецова. – DOI 10.31660/0445-0108-2023-1-45-59 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2023. – № 1. – С. 45–59.

Features of compaction of sedimentary rocks of oil and gas deposits

Vener G. Mamyashev*, Anna M. Kuznetsova

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**tmngeofiz@mail.ru*

Abstract. The process of compaction of sediments determines the patterns of changes in the properties of rocks of oil and gas bearing sections, primarily their porosity. The porosity of rocks of different lithology varies depending on their depth. The study of the regularities of changes in the porosity of rocks is important for the identification of geological sections, for substantiating the intervals of the existence of reservoirs with intergranular porosity type, for forecasting the properties of support layers by section and for methodological support for the geological interpretation of the materials of geophysical studies of wells. The existing concept of gravitational compaction of sediments doesn't reflect a number of features of this process of rocks in real conditions. The article substantiates the conditions of precipitation formation corresponding to their transition to an initial relatively stable state. The features of precipitation formation in the initial marine and continental conditions, as well as the features of their formation in permafrost strata are substantiated.

The general patterns and features of the compaction curves of typical sandstones and clays are considered according to the data of reference wells drilled within the West Siberian oil and gas basin.

Keywords: sedimentary rocks, normal compaction, porosity, typical sandstones and clays

For citation: Mamyashev, V. G., & Kuznetsova, A. M. (2023). Features of compaction of sedimentary rocks of oil and gas deposits. *Oil and Gas Studies*, (1), pp. 45-59. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2023-1-45-59

Введение

Изучение закономерностей изменения пористости пород нефтегазовых отложений от глубины их залегания имеет как прикладное, так и научное значение. Это направление остается одной из актуальных задач петрофизических и геолого-геофизических исследований разрезов, представленных осадочными песчано-глинистыми породами.

Наиболее полное представление о результатах работ, выполненных отечественными и зарубежными исследователями в этом направлении, приведено в монографии А. А. Грауссмана [1]. В ней отмечается, что начало научного этапа исследований уплотнения грунтов и осадков относится к 20-м годам XX века, когда К. Терцаги была представлена попытка формализации процесса уплотнения не связанных грунтов с помощью упрощенного дифференциального уравнения [2]. Различные вопросы уплотнения осадочных песчано-глинистых пород, слагающих геологических объекты, рассмотрены в работах отечественных ученых: Г. М. Авчана, Н. Б. Вассоевича, В. М. Добрынина, В. Д. Ломтадзе, И. И. Нестерова, Б. К. Прошлякова, Г. И. Теодоровича, А. А. Чернова и др. Среди зарубежных исследователей необходимо отметить работы Д. Бреста и М. Пауэрса, Дж. Максвелла, У. Уэллера, Х. Хедберга, Л. Эзи. Отражение процессов уплотнения песчано-глинистых пород в материалах и результатах геофизических исследований разрезов скважин приводится в работах [3–7].

Объект и методы исследования

Объектом исследований является механизм гравитационного уплотнения терригенных осадочных пород с глубиной их залегания, начиная с обоснования понятия «стабильного» осадка, его свойств и условий формирования осадков «чистых» песчаников и глин. Методы исследований включают обобщение и анализ априорной информации, логическое моделирование процесса уплотнения и его этапов, обработку и анализ результатов экспериментальных исследований.

Процессы уплотнения обломочных осадочных пород и их особенности. Результаты сопоставлений пористости образцов песчано-глинистых осадков и пород с глубиной их залегания, выполненных для разных осадочных бассейнов с преимущественно равномерным характером накопления осад-

ков, практически не осложненным тектоническими факторами, позволили выявить следующие общие закономерности.

Наблюдается преимущественно монотонное уменьшение пористости песчано-глинистых пород и, соответственно, их объема с ростом глубины залегания пород [7–10]. Характер уплотнения зависит от гранулометрического и минерального составов исходного осадочного материала. Более интенсивно уплотняются глины. С уменьшением глинистости и переходом к «чистым» пескам интенсивность уплотнения осадков снижается. Было отмечено, что мономинеральные кварцевые осадки и породы уплотняются в несколько меньшей мере, чем породы кварц-полевошпатового и полимиктового составов. Прослой плотных карбонатизированных разностей песчано-алевритовых пород имеют аномальный характер уплотнения, определяемый особенностями формирования их в толще терригенных осадочных пород еще на начальной стадии уплотнения осадка [6]. Следствием этого являются резкое снижение сжимаемости прослоев карбонатизированных пород и довольно слабое последующее изменение их пористости с ростом глубины залегания. Было также установлено влияние постседиментационных (эпигенетических) преобразований твердой минеральной компоненты формируемых пород. Эффективность этих преобразований зависит от температуры и возраста осадков.

Накопленные фактические материалы подтверждают определяющее влияние механизма гравитационного уплотнения осадков и пород под действием эффективного давления. Поскольку сжимаемостью твердой минеральной компоненты пород и сжимаемостью поровой воды можно пренебречь, то уплотнение пород объясняется в первую очередь уменьшением их пористости.

Вертикальные тектонические движения осадочных толщ могут приводить как к «недоуплотнению», так и к «переуплотнению» осадков и пород. Значительное внимание исследователей было уделено описанию аппроксимации результатов сопоставления коэффициента пористости и глубины (далее — кривых уплотнения пород). В итоге было установлено, что в зависимости от объекта и задач исследований можно воспользоваться разными видами аппроксимации эмпирических зависимостей пористости от глубины. Процессы уплотнения глин удобнее описывать с помощью показательной, экспоненциальной или логарифмической зависимостей. Уплотнение песчано-алевритовых пород может быть представлено полиномиальными или линейными и кусочно-линейными уравнениями [1]. В большинстве случаев преобладает сложный, полиномиальный характер зависимостей. Немаловажную роль играют цели тех или иных сопоставлений, например: обоснование средних или наиболее вероятных значений пористости пород по разрезу либо обоснование средней пористости отдельных литологических типов пород (глин-аргиллитов, алевролитов, песчаников, плотных карбонатизированных разностей). Часто рассматривают сопоставления для наиболее вероятных (наибольших или наименьших)

значений пористости пород, слагающих опорные пласты, а также для отдельных литологических типов пород [11]. Во всех этих случаях виды уравнений аппроксимации могут несколько отличаться.

Принято считать, что процесс уплотнения осадков, определяемый эффективным давлением, при отсутствии денудации осадков является нормальным [12]. Соответственно, зависимости изменения пористости пород от глубины их залегания принято называть «кривыми нормального уплотнения» (КНУ).

Эффективное давление ($P_{эф}$) традиционно представляют как разность горного (геостатического) и порового (пластового) давлений

$$P_{эф} = P_{гор} - P_{пл}.$$

В открытых осадочных бассейнах пластовое давление в первом приближении соответствует гидростатическому давлению столба воды ($P_{гдс}$), то есть $P_{пл} \approx P_{гдс}$, в таких случаях можно принять, что $P_{эф} = P_{гор} - P_{гдс}$. Значения давлений можно выразить через глубину залегания ($H_{п}$) и среднюю плотность ($\delta_{п.ср}$) среды: $P_{гор} = g \cdot H_{п} \cdot \delta_{п.ср}$ и $P_{гдс} = g \cdot H_{в} \cdot \delta_{в.ср}$, где $H_{в}$ — высота столба воды; g — ускорение силы тяжести; $\delta_{в.ср}$ — средняя плотность воды.

Согласно современным представлениям [13], среднее напряженное состояние пород ($P_{г}$), определяемое горным давлением, можно представить как среднее арифметическое значение суммы напряжений, действующих на элементарный объем породы в трех взаимно ортогональных направлениях (P_z, P_x, P_y), то есть как $P_{г} = (P_z + P_x + P_y) / 3$. Горное давление в этом случае определяется как

$$P_{г} = [(1 + 2k) / 3] \cdot g \cdot H_{п} \cdot \delta_{п.ср}, \quad (1)$$

где g — ускорение силы тяжести (свободного падения); $H_{п}$ — высота столба осадка, то есть глубина его залегания; $\delta_{п.ср}$ — средняя плотность осадка; $k = \nu / (1 - \nu)$ — коэффициент бокового распора ($k = P_x / P_z \approx P_y / P_z$), ν — коэффициент Пуассона породы. Величина коэффициента Пуассона составляет 0,5 в абсолютно пластичных телах и стремится к нулю в абсолютно упругих (хрупких) телах. Если в исходном осадке можно принять $\nu = 0,5$, то в консолидированных песчаниках и аргиллитах величина его составит около 0,2÷0,35. Экспериментальное обоснование эффективного значения коэффициента Пуассона, действовавшего в процессе уплотнения той или иной породы, не представляется возможным. Потому в той же работе [13] отмечается, что в практических оценках «...часто значение коэффициента k принимается равным единице».

Вместе с тем очевидна возможность обоснования давления в горизонтальной плоскости $P_x \approx P_y$ по величине давления гидроразрыва пластов ($P_{грп} = P_x \approx P_y$), тогда можно определить значение коэффициента бокового

распора как $k = P_{\text{гпп}}/P_{\text{г}}$. Так, например, по материалам гидроразрыва пластов группы БВ Нижневартовского свода, залегающих на глубинах 2 100–2 400 метров, величина его составила $k = 0,75 \div 0,82$. Соответственно, среднее эффективное напряженное состояние этой части разреза составит $P_{\text{г}} = [0,83 \div 0,86] \cdot g \cdot H_{\text{п}} \cdot \delta_{\text{п.ср}} = [0,83 \div 0,86] \cdot P_{\text{гор}}$. Из этого условия следует, что при моделировании влияния термобарических условий на емкостные и иные свойства пород величина эффективного давления должна определяться следующим образом:

$$P_{\text{эф}} = (1 + 2 \cdot P_{\text{гпп}}/P_{\text{г}})/(3 \cdot P_{\text{гор}} - P_{\text{пл}}) . \quad (2)$$

При нормальном уплотнении по умолчанию принимается, что высоты столбов осадка и воды одинаковы и равны глубине залегания породы $H_{\text{п}} = H_{\text{в}}$.

Однако в континентальных условиях осадкообразования создаются условия для их переуплотнения, поскольку толщины вышележащих осадков, определяемые как $H_{\text{п}} = H_{\text{а}} + \Delta h$, будут превышать толщину (высоту) столба воды в них: $H_{\text{в}} = H_{\text{а}} + \Delta h_{\text{в}}$, где $H_{\text{а}}$ — абсолютная глубина залегания рассматриваемого осадка; Δh и $\Delta h_{\text{в}}$ — превышения высоты осадка и уровня грунтовых вод над уровнем мирового океана. Эффективное давление в рассматриваемом осадке составит

$$P_{\text{эф}} = g \cdot (H_{\text{а}} + \Delta h) \cdot \delta_{\text{п.ср}} - g \cdot (H_{\text{а}} + \Delta h_{\text{в}}) \cdot \delta_{\text{в.ср}} . \quad (3)$$

В пределе можно допустить, что $\Delta h_{\text{в}} = 0$, тогда эффективное давление будет превышать «нормальное» на $\Delta P_{\text{эф}} = g \cdot \Delta h \cdot \delta_{\text{п.ср}}$, где $\delta_{\text{п.ср}}$ — средняя плотность осадка, находящегося «над уровнем моря», в пределах Δh . При разности уровней $\Delta h - \Delta h_{\text{в}} \leq 25$ м различием их в уравнении (3) можно пренебречь, поскольку завышение эффективного давления будет не более 0,5 МПа, что практически не скажется на изменении пористости пород. Противоположная ситуация возникает в осадках, находящихся или формировавшихся в морских акваториях. Толщины их оказываются меньше абсолютных глубин залегания на величину $\Delta h_{\text{г}}$, равную глубине морского бассейна: $H_{\text{п}} = H_{\text{а}} - \Delta h_{\text{г}}$. В этом случае гидростатическое давление с достаточным приближением составит $P_{\text{гдс}} = H_{\text{а}} \cdot \delta_{\text{п.ср}}$, а эффективное

$$P_{\text{эф}} = g \cdot [(H_{\text{а}} - \Delta h_{\text{г}}) \cdot \delta_{\text{п.ср}} - H_{\text{а}} \cdot \delta_{\text{в.ср}}] . \quad (4)$$

Оно будет меньше «нормального» эффективного давления на $\Delta P_{\text{эф}} = g \cdot \Delta h_{\text{г}} \cdot \delta_{\text{п.ср}}$, соответственно, возможно недоуплотнение осадков. По мере продолжающегося осадконакопления толщины осадков будут стремиться к абсолютным глубинам их залегания, соответственно, $\Delta h_{\text{г}} \rightarrow 0$, тогда уравнения (3) и (4) преобразуются к традиционному виду

$$P_{\text{эф}} = g \cdot H_a(\delta_{\text{п.ср}} - \delta_{\text{в.ср}}). \quad (5)$$

Тем не менее периоды нахождения осадков, как в континентальных, так и в морских условиях могут отразиться на особенностях характеров их уплотнения. Существенную роль при этом будут играть постседиментационные преобразования, прежде всего, цементирующей составляющей пород. Они обусловлены растворением и переотложением минерального вещества, приводящим к карбонатизации и окремнению осадка. Кроме того, происходят эпигенетические преобразования минералов: пеллитизация и разрушение неустойчивых минералов (полевых шпатов, слюд и др.); происходит трансформация глинистых минералов, например, монтмориллонита в гидрослюда и далее — в хлорит и каолинит.

Процесс нормального уплотнения осадков нарушается также в интервалах проявления многолетней мерзлоты. В северных и приполярных территориях континентальных участков земной коры современные абсолютные отметки подошвы многолетней мерзлоты в терригенных обломочных осадках могут достигать 500–700 метров. Эффективное давление, а также интенсивность физико-химических процессов и собственно процесса уплотнения в интервалах многолетнемерзлых осадков резко снижаются. Последующее захоронение их в область положительных температур предполагает частичное «возвращение» к закону нормального уплотнения осадков.

Все перечисленные особенности необходимо учитывать при анализе кривых уплотнения осадочных пород и обосновании аналитического описания процесса их уплотнения.

Наиболее общее выражение закона нормального уплотнения осадков и пород, предложенное в работе В. М. Добрынина, Б. Ю. Вендельштейна и Д. А. Кожевникова [9], имеет следующий вид:

$$\frac{K_{\text{п, h}}}{K_{\text{п, h=0}}} = \frac{\exp[-\beta_{\text{п}}(t, T) \cdot g(\delta_{\text{п.ср}} - \delta_{\text{в.ср}}) \cdot H]}{1 - K_{\text{п, h=0}} \cdot \{(1 - \exp[-\beta_{\text{п}}(t, T) \cdot g(\delta_{\text{п.ср}} - \delta_{\text{в.ср}}) \cdot H])\}}, \quad (6)$$

где $\beta_{\text{п}}(t, T)$ — коэффициент необратимого уплотнения пород; H — глубина в км, $K_{\text{п, h=0}}$ — начальная пористость объекта, $K_{\text{п, h}}$ — прогнозируемая пористость на глубине H . Отмечается, что величина коэффициента необратимого уплотнения зависит от геологических условий: возраста, температуры и литологии пород, а также то, что применение его для решения задач прогноза уплотнения осадков в реальных условиях требует учета влияния дополнительных факторов.

Начальная пористость объекта $K_{\text{п, h=0}}$ сформулирована в этой работе как пористость его «...на поверхности» [9]. Если рассматривать пористость на поверхности исходного осадка, то для глин (илов) она варьирует от 55–56 до 75–77 %, а для песка — примерно от 42 до 46 %. В таком

случае рассматриваемые объекты представляют собой скорее взвеси ($K_n \geq 50\%$), имеющие довольно нестабильное состояние.

Известно, что формирование строения и относительно стабильного состояния исходных песчано-алевритовых осадков относится к стадии седиментогенеза и завершается примерно на глубине, соответствующей границе штормового воздействия на них [7]. Таким образом, $K_{n,h=0}$ песков и алевритов предлагается принимать на глубине примерно 15–20 метров. На этой глубине пористость чистого отсортированного песка составляет около $K_{n,пч,h=0} = 42 \pm 2\%$. Глинистые осадки формируются в глубоководной среде, начальную пористость их предлагается оценивать при толщине придонного ила не менее 10–15 метров. Для чистой глины она составит около $K_{n,гл,h=0} = 45 \pm 4\%$ [1].

Один из итогов седиментогенеза — выпадение обломочного материала в осадок и физико-химическое равновесие осадка с продуктами его же растворения (CaCO_3 , Mg, Fe, Mn, Al, SiO_2 и др.).

Дальнейшее преобразование осадка относится к стадии диагенеза в результате которого «...происходит преобразование осадка в породу путем постепенного его уплотнения, изменения минерального состава и приобретения новых физико-химических свойств» [14]. Уравнение (5) позволяет отобразить процесс диагенетического уплотнения осадков при нормальном характере их уплотнения в пределах определенного временного интервала. Этот временной интервал определяется геологическими условиями, конкретными по времени уплотнения, температуре и эффективному давлению для каждого типа осадков, различающихся по минеральному и гранулометрическому составам и плотности. Это означает, что для каждого литологического типа породы (исходного осадка) будут наблюдаться свои зависимости и свои особенности уплотнения.

Все приведенное выше свидетельствует о том, что кривые уплотнения осадков и изменения пористости осадочных терригенных пород с глубиной их залегания могут иметь достаточно сложный характер. Вместе с тем для однотипных геологических условий, обычно определяющих принципы районирования на отдельные нефтегазоносные районы, предполагается идентичность этих кривых.

Особое внимание при этом следует обратить на влияние цементации пород карбонатным материалом на величину коэффициента необратимого уплотнения. Этот процесс не может быть в полной мере отнесен к этапу постседиментационных (эпигенетических) преобразований, поскольку карбонатизация проявляется еще на начальной стадии диагенеза, то есть до начала литификации осадка. Содержание аутигенного базального карбонатного цемента в прослоях карбонатизированных пород достигает 30–35 %. При этом пористость их составляет от 3–4 до 6–8 %. Это означает, что открытая пористость песчаного и алевритового осадков на момент начала карбонатизации могла достигать 38–40 %, то есть осадок находится еще в начальной стадии уплотнения.

Прослои плотных карбонатизированных песчано-алевритовых пород начинают формироваться вследствие выпадения карбонатного материала (кальцита, доломита, сидерита) из иллизионных вод, отжимаемых из вмещающих глинистых осадков в виде непротяженных линзовидных тел небольшой толщины. Практически полное заполнение им межзернового порового пространства приводит к резкому снижению сжимаемости плотных пород. Установлено, что содержание карбонатного цемента до 4–5 % (весовых) способствует повышению жесткости «скелета» чистых песчано-алевритовых пород и несколько меньшей степени их уплотнения по сравнению с аналогичными породами без следов карбонатизации.

Нормальное уплотнение представляет непрерывный процесс уменьшения пористости объектов от исходной пористости ($K_{п.гл,h=0}$ и $K_{п.пч,h=0}$) по мере захоронения их под накапливающимися осадками.

С некоторой условностью можно выделить несколько стадий (этапов) изменения механизма уплотнения и состояния осадков-пород.

Результаты

Уплотнение глин. На первой стадии уплотнения происходит вытеснение из них свободной воды [1]. Свойства ее такие же, как и в равновесном с осадком растворе. Процесс этот затухает по мере формирования механических контактов гидратированных глинистых частиц друг с другом и взаимной переупаковки их вплоть до условия $K_{ов,гл} = 1$. Затем, при пористости глин примерно от 25–28 % для бентонита и 12–15 % для каолинита (рассчитанных на основании данных [15]), начинается процесс вытеснения межпакетной воды глин и воды дальней гидратации адсорбированных ионов (преимущественно катионов). На этой стадии наблюдается явление уменьшения минерализации вытесняемых иллизионных вод [14]. Одновременно начинается процесс трансформации разбухающих глинистых минералов (монтмориллонита и смешанослойных) в более стабильные: гидрослюды, хлорит и каолинит. По данным И. И. Нестерова [6], в осадочном чехле Западно-Сибирской низменности большая часть этого процесса завершается на глубинах около 2 500–2 700 м и пористости глин около 7–11 %. Это соотносится с мнением И. Н. Ушатинского [16] о том, что примерно в указанном интервале глубин происходит трансформация глин в аргиллиты.

Уплотнение песков. В первом приближении этот процесс можно представить линейной зависимостью пористости от глубины залегания осадка. На начальной стадии диагенеза уплотнение и, соответственно, уменьшение пористости песка происходит вследствие переупаковки зерен твердой фазы. Этот процесс предполагает «вытеснение» более мелких фракций и мелкодисперсного глинистого материала в пространство между более крупными зернами, а также более плотное «прилегание» их друг к другу. На этом же этапе начинается консолидация осадков. Активное участие в этом принимают иллизионные воды. В глинах они имели повышен-

ную кислотность и, соответственно, повышенную растворяющую способность. Воды песков имеют преимущественно щелочной характер, что способствует выпадению из поступающих в них иллизионных вод карбонатного материала. По Н. М. Страхову [7], начальная стадия диагенеза, соответствующая формированию «уплотненного осадка», простирается примерно до 500 м, а литификация их завершается на глубине около 1 000 метров. Приведенные оценки предполагаются для «обычных» условий осадкообразования, поскольку не учитывают формирование и влияние многолетней мерзлоты. Очевидно, что в таких случаях процессы уплотнения и физико-химических преобразований в многолетнемерзлых осадках замедляются и активизируются только после их растепления.

Дальнейшее уплотнение пород относится к стадии катагенеза и объясняется влиянием ряда процессов: растворением минералов в точках контактов зерен, в которых возникают участки повышенных напряжений; формированием сутурных контактов; дроблением зерен, особенно неустойчивых минералов, трансформацией и формированием новообразованных аллотегенных минералов.

Особые условия уплотнения возникают в интервалах проявления аномальных пластовых давлений, прежде всего при аномальных высоких значениях пластовых давлений (АВПД). Не затрагивая причины формирования аномальных давлений, отметим, что в таких объектах пластовое давление может заметно превышать уровень нормального гидростатического давления, тогда $P_{пл} = K_a \cdot P_{гдс} = K_a \cdot g \cdot H_v \cdot \delta_{в,ср}$, где K_a — коэффициент аномальности пластового давления. При $K_a > 1$ величина эффективного давления уменьшается, соответственно, уменьшается степень уплотнения породы — несколько завышается их пористость. Выше и ниже проницаемого пласта-коллектора формируются «зоны вторжения» АВПД во вмещающие глины (аргиллиты). С одной стороны, это приводит к некоторому увеличению их пористости, а с другой — к «дискованию» и разрушению отбираемого из них керна. Соответственно, не удастся обнаружить и выделить эти зоны на керновых данных.

Приведенное краткое описание позволило конкретизировать некоторые особенности процесса уплотнения обломочных осадочных пород.

Закономерности уплотнения осадочных пород на примере Западно-Сибирской равнины. Эти закономерности в разной степени рассматривались в работах В. Х. Ахиярова, А. И. Гальченко, Р. Г. Демина, Л. М. Дорогиницкой, Н. А. Ирбэ, В. Г. Мамяшева, В. П. Сонича, Н. А. Туезовой, Ф. З. Хафизова, Л. Ф. Шестаковой и других специалистов.

Первый этап таких исследований относится к периоду пионерного изучения глубинного строения разреза Западной Сибири по результатам опорного бурения. Всего предполагалось бурение 29 скважин глубиной до 2–3 км. Часть из них была запланирована на прилегающих территориях Красноярского края и Казахстана. Результаты исследований опорных скважин были отражены в монографии Н. А. Туезовой с соавторами [10].

В ней по результатам исследований керна как опорных, так и ряда поисково-разведочных скважин рассмотрены закономерности изменения с глубиной основных свойств глин-аргиллитов, алевролитов и песчаников для ряда районов Западной Сибири. Отмечается, что в отдельных случаях возникали сомнения как по качеству экспериментальных данных, так и по их представительности. Тем не менее были обоснованы изменения средних значений пористости, плотности, скорости упругих колебаний в этих типах пород в зависимости от глубины их залегания. Эти данные позволили сформировать первые обобщенные представления о петрофизической характеристике пород осадочного чехла Западной Сибири.

Обобщение результатов исследований керна и данных по пробуренным опорным скважинам представлено в публикациях Н. А. Ирбэ с соавторами [17, 18]. В этих работах приведены зависимости изменения открытой пористости образцов глин и песчаников с глубиной их залегания (рисунок).

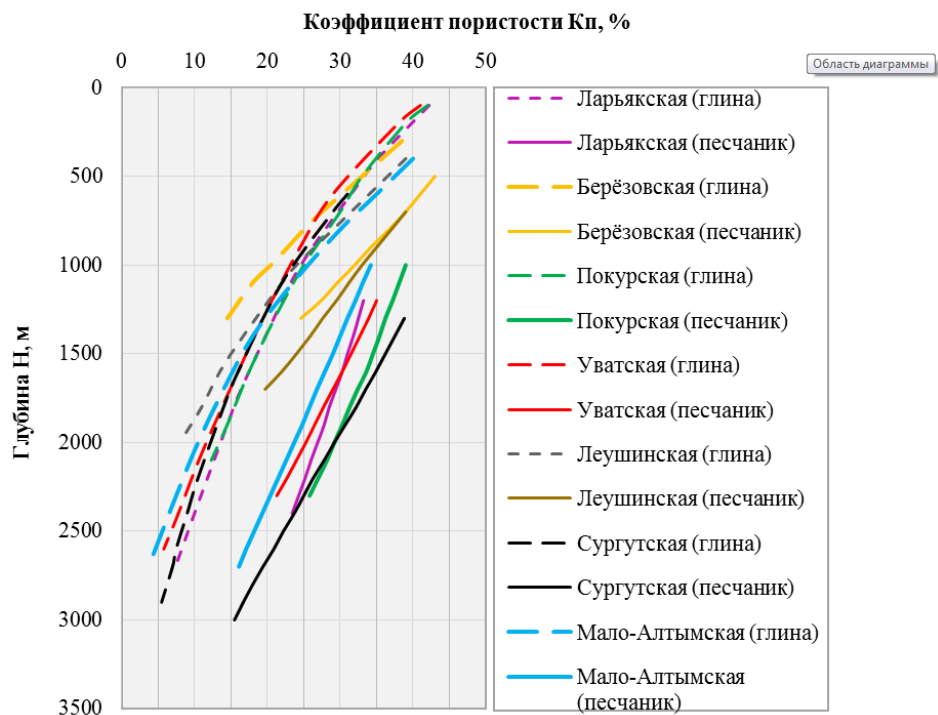


Рисунок. Кривые нормального уплотнения «чистых» глин и песчаников с глубиной по керну опорных скважин на территории Западной Сибири (по Н. А. Ирбэ [17])

В приведенной ниже таблице указаны названия опорных скважин, уравнения аппроксимации полученных зависимостей для «чистых» глин и песчаников, а также интервалы глубины, в которых эти зависимости опре-

делены. В целом интервалы отбора керн ограничены глубинами от первых сотен метров и почти до 3 000 метров. Данные по песчаникам получены в интервале залегания от 1 000–1 200 и до 2 700–3 000 метров. Глубины отбора и исследований глин начинаются со 120–300 метров. Существуют различия в интервалах исследований глин и песчаников в опорных скважинах. В целом это различие является следствием довольно низкого выноса керн, при применявшихся ранее технологиях его отбора, и избирательности его выноса. Обеспечивался вынос преимущественно крепко сцементированных пород (уплотненных и глин). Вероятность выноса менее сцементированных слабглинистых песчаников и алевритов была заметно меньше.

Характеристика материалов, полученных по данным опорного бурения

| Опорные скважины | $K_{\text{по.гл}} = f(H)$ | Интервал глубин, км | $K_{\text{по.макс.}} = f(H)$ | Интервал глубин, км |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|
| Ларьякская | $43,25 - 28,46 \cdot \ln(H+0,92)$ | 0,1–2,7 | $8,33 \cdot H + 45,0$ | 1,2–2,5 |
| Березовская | $39,8 - 37,2 \cdot \ln(H+0,705)$ | 0,3–1,3 | $-21,25 \cdot H + 54,6$ | 0,5–1,3 |
| Покурская | $43,64 - 28,97 \cdot \ln(H+0,92)$ | 0,05–2,3 | $-5,58 \cdot H + 39,08$ | 1,0–2,3 |
| Уватская | $42,59 - 29,64 \cdot \ln(H+0,92)$ | 0,05–2,7 | $-12,7 \cdot H + 49,7$ | 1,0–2,7 |
| Сургутская | $29,47 - 20,66 \cdot \ln(H+0,3)$ | 0,6–3,0 | $-4,37 \cdot H + 57,69$ | 1,25–3,0 |
| Мало-Атлымская | $39,36 - 31,09 \cdot \ln(H+0,54)$ | 0,4–2,8 | $-11,4 \cdot H + 45,47$ | 1,0–2,6 |
| Чулымская, Колпашевская | $36,33 \cdot \exp(-0,48 \cdot H)$ | 0,4–2,6 | $-6,25 \cdot H + 41,0$ | 0,4–2,6 |

Обсуждение

Линии уплотнения глин при $H \rightarrow 0$ большей частью экстраполируются в область пористости 44–46 %, то есть соответствуют предложенным выше значениям.

Наиболее представительные данные о пористости «чистых» песчаников получены по Сургутской и Покурской опорным скважинам. Относительно них выделяются кривые по Березовской, Леушинской, Ларьякской, Уватской и Мало-Атлымской скважинам — смещенные в сторону меньших значений пористости песчаников. При этом линии глин в разрезах этих скважин в разной степени, но также смещены в сторону меньшей пористости. Все эти скважины расположены в прибортовой приуральской зоне Западно-Сибирского осадочного бассейна, соответственно, аномальное положение их свидетельствует о преимущественно континентальных условиях формирования пород в этой части осадочного бассейна. Данные о пористости песчаников в Ларьякской и Уватской скважинах, скорее всего, менее представительны и, соответственно, менее информативны.

Вариации средней пористости глин в интервале продуктивной части разреза (при $H = \text{const.}$) для большей части кривых не превышают 4–5 %. Вариации значений пористости «чистых» песчаников, за исключением данных по Березовской и Леушинской опорным скважинам, составляют 5–7 %. Линии аппроксимации КНУ песчаников близки к линейным, для глин они описываются логарифмическими уравнениями.

Выводы

Таким образом, в представленной работе уточнены некоторые особенности процесса уплотнения терригенных осадочных пород в зависимости от условий формирования осадков.

1. Обосновано, что начальная стадия уплотнения осадка, соответствующая преобразованию его из «взвеси» в «стабильное» состояние, соответствует толщине его не менее 15 м. При этом наиболее вероятная пористость осадка составит $K_{п.г.л, h=0} = 45 \pm 4$ % для «чистых» глин и $K_{п.пч, h=0} = 42 \pm 2$ % для «чистых» песков.

2. Область инверсии пористости глин и песчаников составит около 200 метров, а в случае многолетнемерзлых пород — в пределах 100 метров ниже подошвы их залегания.

3. Обосновано различие положения кривых уплотнения осадков, формировавшихся в континентальных и в морских условиях, проявляющееся в более интенсивном уплотнении их в континентальных условиях.

4. Предполагается, что характер и кривые уплотнения «чистых» глин и песчаников в пределах каждого отдельного типа разрезов и выделяемых на основе этого нефтегазоносных районов сохраняются неизменными. Это условие предполагает возможность обоснования пористости и других свойств опорных пластов глин-аргиллитов и песчаников с помощью установленных соответствующих кривых нормального уплотнения

Последующие исследования процесса уплотнения осадочных пород позволят уточнить особенности влияния перечисленных в данной статье факторов на поведение кривых уплотнения «чистых» песчаников и глин (опорных интервалов пород), объяснить их особенности для различных нефтегазоносных районов или геологических типов разрезов.

Результаты этих исследований будут представлены в следующих публикациях.

Список источников

1. Граусман, А. А. Закономерности изменения поровых коллекторов при погружении: модель гравитационного уплотнения / А. А. Граусман. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1984. – 136 с. – Текст: непосредственный.

2. Терцаги, К. Теория механики грунтов / К. Терцаги; перевод с немецкого И. С. Утевского; под общей редакцией Н. А. Цытовича. – Москва: Гостройиздат, 1961. – 507 с. – Перевод изд.: *Theoretical Soil Mechanics* / Karl Terzaghi. New York, 1943. – Текст: непосредственный.

3. Дьяконова, Т. Ф. Промышленная оценка юрских неантиклинальных залежей нефти в Западной Сибири по комплексу геолого-геофизических и промысловых данных : специальность 04.00.12. «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Дьяконова Татьяна Федоровна. – Москва, 1993. – 49 с. – Место защиты : Государственная Академия нефти и газа им. И. М. Губкина. – Текст : непосредственный.
4. Кожевников, Д. А. Проблемы интерпретации данных ГИС / Д. А. Кожевников. – Текст : непосредственный // Геофизика. – 2001. – № 4. – С. 20–30.
5. Зэчжан С. Повышение эффективности прогнозирования содержания природного газа в континентальных сланцевых породах на примере бассейна Ордос / С. Зэчжан, М. А. Лобусев, Д. Дженсюэ. – Текст : непосредственный // Газовая промышленность. – 2017. – № 6 (753). – С. 40–48.
6. Геология нефти и газа Западной Сибири / А. Э. Конторович, Н. И. Нестеров, Ф. К. Салманов [и др.]. – Москва : Недра. – 1975. – 680 с. – Текст : непосредственный.
7. Страхов, Н. М. Основы теории литогенеза / Н. М. Страхов ; Академия наук СССР. Геол. ин-т. – 2-е изд. – Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1962. – Т. 2. – 550 с. – Текст : непосредственный.
8. Выбор раствора для разбуривания глинистых пород / В. Н. Кошелев, М. С. Гвоздь, Б. А. Растегаев [и др.]. – Текст : непосредственный // Бурение и нефть. – 2015. – № 9. – С. 27–32.
9. Добрынин, В. М. Петрофизика : учебник / В. М. Добрынин, Б. Ю. Вендельштейн, Д. А. Кожевников. – Москва : Недра, 1991. – 368 с. – Текст : непосредственный.
10. Физические свойства горных пород Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции / Н. А. Туезова, М. М. Дорогиницкая, Р. Г. Демина, Н. И. Брюзгина. – Москва : Недра. – 1975. – 185 с. – Текст : непосредственный.
11. Балабанов, Ю. П. Геофизические методы изучения геологопромысловых характеристик продуктивных пластов : методическое пособие / Ю. П. Балабанов, И. П. Зинатуллина. – Казань : Казанский университет, 2016. – 47 с. – Текст : непосредственный.
12. Тектоническое районирование и геохимия чехла Западно-Сибирской платформы / Г. С. Гусев, О. Н. Сироткина, Н. В. Межеловский, В. А. Килипко. – Текст : непосредственный // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2016. – Т. 91, № 4–5. – С. 123–135.
13. Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин : справочник / Под редакцией В. М. Добрынина. – Москва : Недра, 1988. – 475 с. – Текст : непосредственный.
14. Геологический словарь : в 2 томах / Под редакцией К. Н. Паффенгольц. – 2-е изд., перераб. – Москва : Недра, 1973. – Т. 2. – 456 с. – Текст : непосредственный.
15. Крюков, П. А. Некоторые вопросы исследования горных растворов / П. А. Крюков. – Текст : непосредственный // Труды геохимической конференции, посвященной столетию со дня рождения В. И. Вернадского. Сборник «Химия земной коры». – Москва, 1964. – Т. 2. – С. 456–469.

16. Зарипов, О. Г. Карбонатная цементация коллекторов в нефтяных и газовых залежах Западной Сибири в связи с их образованием / О. Г. Зарипов, И. Н. Ушатинский, В. И. Конохов. – Текст : непосредственный // Труды Зап.-Сиб. НИГРИ. – 1970. – Вып. 35. – С. 193–210.

17. Ирбэ, Н. А. Закономерности изменения пористости и проницаемости осадочных пород Западной Сибири / Н. А. Ирбэ, Л. Ф. Шестакова. – Текст : непосредственный // Труды ЗапСибНИГНИ. – 1986. – Вып. 203. – С. 95–103.

18. Ирбэ, Н. А. Сводные геолого-геофизические разрезы нефтегазоносных областей Западно-Сибирской низменности и их особенности / Н. А. Ирбэ. – Текст : непосредственный // Труды ЗапСибНИГНИ. – 1972. – Вып. 54. – С. 3–176.

19. Геофизические исследования Западной Сибири : обобщение результатов интерпретации 10.02.2023 промыслово-геофизических данных / Под редакцией И. И. Нестерова, В. С. Кудрявцева. – Тюмень, 1972. – 214 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Grausman, A. A. (1984). Zakonomernosti izmeneniya porovykh kollektorov pri pogruzhении: model' gravitatsionnogo uplotneniya. Yakutsk, YAF SO AN SSSR Publ., 136 p. (In Russian).

2. Tertsagi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. New York, John Wiley and Sons, 500 p. (In English).

3. D'yakonova, T. F. (1993). Promyshlennaya otsenka yurskikh neantiklinal'nykh zalezhey nefi v Zapadnoy Sibiri po kompleksu geologo-geofizicheskikh i promyslovykh dannykh. Avtoref. diss. ... dokt. geol.-mineral. nauk. Moscow, 49 p. (In Russian).

4. Kozhevnikov, D. A. (2001). Problemy interpretatsii dannykh GIS. Geofizika, (4), pp. 20-30. (In Russian).

5. Zeczhang, S., Lobusev, M. A., & Jengxue, J. (2017). Increasing the efficiency of forecasting the content of natural gas in continental shale rocks using the example of the Ordos basin. Gas Industry, (6(753)), pp. 40-48. (In Russian).

6. Kontorovich, A. E., Nesterov, I. I., Salmanov, F. K., Surkov, V. S., Trofimuk, A. A., & Erv'e, Yu. G. (1975). Geologiya nefi i gaza Zapadnoy Sibiri. Moscow, Nedra Publ., 680 p. (In Russian).

7. Strakhov, N. M. (1962). Osnovy teorii litogeneza. 2nd edition. Tom 2. Moscow, Akademiya nauk SSSR Publ., 550 p. (In Russian).

8. Koshelev, V. N., Gvozd, M. S., Rastegaev, B. A., Ulshin, V. A., & Fatkullin, T. G. (2015). The choice of solution for drilling-off in clay rocks. Burenie i nef', (9), pp. 27-32. (In Russian).

9. Dobrynin, V. M., Vendel'shteyn, B. Yu., & Kozhevnikov, D. A. (1991). Petrofizika. Moscow, Nedra Publ., 368 p. (In Russian).

10. Tuezova, N. A., Doroginitskaya, M. M., Demina, R. G. & Bryuzgina, N. I. (1975). Fizicheskie svoystva gornyykh porod Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provintsii. Moscow, Nedra Publ., 185 p. (In Russian).

11. Balabanov, Yu. P., & Zinatullina, I. P. (2016). Geofizicheskie metody izucheniya geologopromyslovykh kharakteristik produktivnykh plastov. Kazan, Kazan University Publ., 47 p. (In Russian).

12. Gusev, G. S., Sirotkina, O. N., Mezhelovsky, N. V., & Kilipko, V. A. (2016). Tectonic zonation and geochemistry of West Siberian platform cover. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series*, 91(4-5), pp. 123-135. (In Russian).
13. Dobrynin, V. M. (1988). *Interpretatsiya rezul'tatov geofizicheskikh issledovaniy neftyanykh i gazovykh skvazhin*. Moscow, Nedra Publ., 475 p. (In Russian).
14. Paffengol'ts, K. N. (Ed.) (1973). *Geologicheskii slovar': v 2 tomakh. 2nd edition, expanded*. Tom 2. Moscow, Nedra Publ., 456 p. (In Russian).
15. Kryukov, P. A. (1964). *Nekotorye voprosy issledovaniya gornykh rastvorov. Trudy geokhimicheskoy konferentsii, posvyashchennoy stoletiyu so dnya rozhdeniya V. I. Vernadskogo. Sbornik "Khimiya zemnoy kory"*. Tom 2. Moscow, pp. 456-469. (In Russian).
16. Zaripov, O. G., Ushatinskiy, I. N., & Konyukhov, V. I. (1970). Karbonatnaya tsementatsiya kollektorov v neftyanykh i gazovykh zalezhakh Zapadnoy Sibiri v svyazi s ikh obrazovaniem. *Trudy Zap.-Sib. NIGRI*, (35), pp. 193-210. (In Russian).
17. Irbe, H. A., & Shestakova, L. F. (1986). Zakonomernosti izmeneniya poristosti i pronitsaemosti osadochnykh porod Zapadnoy Sibiri. *Trudy ZapSibNIGNI*, (203), pp. 95-103. (In Russian).
18. Irbe, N. A. (1972). Svodnye geologo-geofizicheskie razrezy neftegazonnykh oblastey Zapadno-Sibirskoy nizmennosti i ikh osobennosti. *Trudy ZapSibNIGNI*, (54), pp. 3-176. (In Russian).
19. Nesterov, I. I., & Kudryavtsev, V. S. (Eds) (1972). *Geofizicheskie issledovaniya Zapadnoy Sibiri: obobshchenie rezul'tatov interpretatsii promyslovo-geofizicheskikh dannyykh*. Tyumen, 214 p. (In Russian).

Информация об авторах

Мамяшев Венер Галиуллинович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры прикладной геофизики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, tmngeofiz@mail.ru

Кузнецова Анна Михайловна, аспирант кафедры прикладной геофизики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Information about the authors

Vener G. Mamyashev, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Associate Professor at the Department of Applied Geophysics, Industrial University of Tyumen, tmngeofiz@mail.ru

Anna M. Kuznetsova, Postgraduate at the Department of Applied Geophysics, Industrial University of Tyumen

Статья поступила в редакцию 01.02.2023; одобрена после рецензирования 08.02.2023; принята к публикации 10.02.2023.

The article was submitted 01.02.2023; approved after reviewing 08.02.2023; accepted for publication 10.02.2023.