

УДК 550:552.52(571.1)

И.А. Родькина¹, Е.С. Казак²**СВЯЗАННАЯ ВОДА В ПОРОДАХ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ДО И ПОСЛЕ ЭКСТРАКЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Представлены первые результаты определения содержания разных видов связанной воды гигрометрическим методом — методом изотермы адсорбции — для экстрагированных образцов пород баженовской свиты. Все полученные изотермы сорбции воды имеют хорошо выраженную S-образную форму, что позволяет определить в образцах максимально возможное количество связанной воды различного типа (моно-, поли- и капиллярной конденсации). Точки перегиба изотерм экстрагированных образцов полностью соответствуют точкам перегиба изотерм неэкстрагированных образцов. По полученным результатам возможно в дальнейшем оценить площадь удельной поверхности образцов, а затем определить коэффициент гидрофобности и параметры связанной нефтенасыщенности.

Ключевые слова: баженовская свита, изотерма адсорбции, остаточная вода, связанная вода, вода монослойной адсорбции, вода полислойной адсорбции, капиллярно-связанная вода.

The first results of determination of the content of different types of bound water by hygrometric method — adsorption isotherm method — for extracted rock samples of Bazhenov formation are presented. All obtained water sorption isotherms have a well-defined S-shape, which allows to determine the maximum possible amount of bound water of different types (mono-, poly- and capillary condensation) in all studied samples. The inflection points of the isotherms of the extracted samples fully correspond to the inflection points of the isotherms of the native samples. Based on the obtained results, it is possible to further estimate the specific surface area of the samples, and then determine the hydrophobicity coefficient and the parameters of the associated oil saturation.

Keywords: Bazhenov formation, adsorption isotherm, pore water, bound water, monolayer adsorption water, multilayer adsorption water, capillary-bound water.

Введение. Открытие промышленных запасов нефти в таких глинистых толщах, как баженовская свита (БС) (J_{3v}) Западной Сибири, ранее считавшихся покрышками, обусловило возникновение ряда методологических трудностей, связанных с необходимостью обоснования основных подсчетных параметров [Гудок и др., 2007].

Одной из главных отличительных особенностей пород БС большинство ученых считают гидрофобность (75–80%) [Дорофеева и др., 1983]. Получение количественной характеристики взаимодействия воды с плохо смачиваемой ею поверхностью имеет значение не только при уточнении основных подсчетных параметров, но и для дальнейшего развития теории происхождения нефти и механизма формирования мест ее скопления [Гудок и др., 2007].

Однако данные последних исследований показали, что породы БС содержат как свободную, так и физически и химически связанную воду [Kazak, Kazak, 2019; Казак и др., 2017]. При этом содержание остаточной поровой воды, т. е. свободной, и части связанной воды, находящейся в поровом про-

странстве породы и снижающей ее проницаемость для нефти, составляет 0,42–3,65 масс.% [Казак и др., 2017].

При этом результаты исследования водосодержания разных типов воды в породах заставляют пересмотреть представления об однозначной гидрофобности большинства образцов пород БС [Родькина и др., 2019]. Присутствие в поровом пространстве отложений БС воды различных видов (моно-, поли- и капиллярносвязанной) значительно влияет прежде всего на процесс адсорбции углеводородов, а также на их движение при вытеснении водой из пласта в процессе разработки. Таким образом, в поровом пространстве пород БС могут быть как гидрофобные, так и гидрофильные участки поверхностей минералов, что в свою очередь будет определять смачиваемость отложений БС и влиять на поведение флюидов в пласте.

Известно, что какова модель структуры поверхности твердого тела, таков и механизм взаимодействия воды с ней, т. е. такова структура воды в приповерхностном слое. Форма изотерм адсорбции

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, науч. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: irina-rodkina2007@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: Kanigu@mail.ru

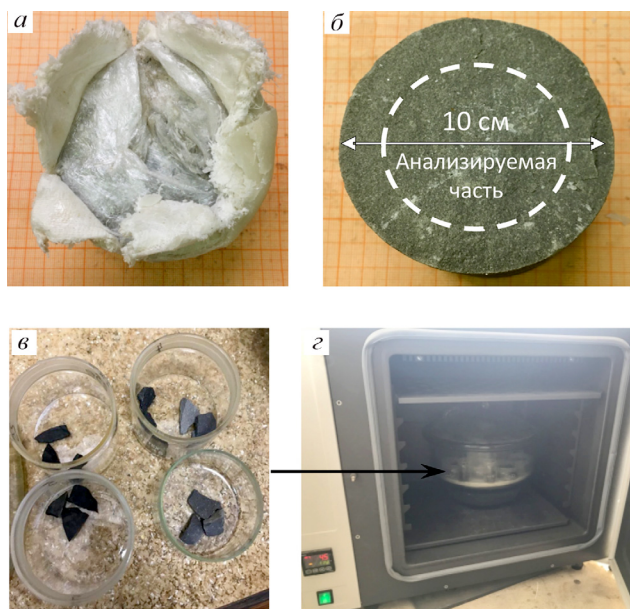


Рис. 1. Фото образцов керна БС: *а* — в процессе вскрытия парафиновой оболочки; *б* — перед отбором представительной пробы; *в* — в бюксах; *г* — в бюксах в закрытом эксикаторе, находящемся в термостате

отображает разные механизмы взаимодействия молекул воды с неоднородной по смачиваемости поверхностью [Гудок и др., 2007], соответственно, выявление адсорбционных взаимодействий пород БС с водой крайне важно и актуально.

Ранее авторами статьи были проведены экспериментальные исследования неэкстрагированных образцов БС [Родькина и др., 2019]. Однако для обоснования влияния присутствия углеводов на процесс адсорбции воды пород БС необходимо отдельно исследовать сорбцию на образцах пород БС, подверженных экстракции. Здесь приведены результаты исследования и сравнительный анализ с неэкстрагированными образцами пород.

Материалы и методы исследований. Исследования проводились на 11 образцах пород БС, отобранных из керна скважин, расположенных в пределах Нижневартовского свода Западной Сибири. Важно, что все исследования выполнены на свежетоотобранных полноразмерных образцах керна, запарафинированных сразу после вскрытия керноприемных труб (рис. 1). Кусочки породы для исследований отбирали из центральной части образца, что практически исключало использование проб, загрязненных буровым раствором. Затем часть образцов была использована для получения изотерм сорбции в неэкстрагированных образцах, другая же часть после определения водо- и нефтенасыщенности по стандартной методике была подвержена экстракции в аппарате Закса. Подробная методика и характеристика экстракции представлены в работе [Kazak, Kazak, 2020].

Построение изотерм адсорбции воды на образцах пород БС после экстракции углеводов выполнено гигрометрическим методом, суть кото-

рого для неэкстрагированных образцов пород БС подробно описана в статье [Родькина и др., 2019].

Минеральный состав образцов определяли на неэкстрагированных образцах рентгеноструктурным анализом на современном специальном рентгеновском дифрактометре «Дрон-3М» с программным управлением хода анализа (рабочий ток 20 мА, рабочее напряжение 30 кВ, съемка проводилась с рентгеновской трубкой с Со-антикатодом). Подробное описание методики и результаты определения представлены в работе [Kazak, Kazak, 2019].

Результаты исследований и их обсуждение.

Исследованная коллекция образцов пород БС по классификации sCorg в целом определена как кремнисто-глинисто-карбонатная и представлена следующими литологическими типами: литотип с преобладанием кремния, кремнистый аргиллит с большим содержанием глины, смешанный кремнистый аргиллит и глинисто-кремнистый аргиллит [Kazak, Kazak, 2019; Родькина и др., 2019].

В результате экспериментов для каждого образца получена изотерма адсорбции; так как во всех экспериментах исследованы три параллельных образца, каждая изотерма построена по 33 экспериментальным точкам.

Из всего многообразия полученных изотерм ранее нами было выделено несколько групп для неэкстрагированных образцов БС. Объединение в группы сделано на основании формы полученных изотерм, минерального состава образцов и количества связанной воды каждого вида (моно-, полисорбционной и капиллярной конденсации) [Родькина и др., 2019]. Затем сравнение изотерм на образцах до и после экстракции выполнялось в зависимости от выделенных групп.

Рассмотрим изотермы, полученные на группах образцов 12 и 14, общий вид которых представлен на рис. 2, *а*. Кривые имеют ярко выраженную S-образную форму (с явно обозначенными точками перегиба (при $P/P_s=0,15$ и $0,9$)). Первая точка перегиба соответствует содержанию воды мономолекулярной адсорбции от 0,30 до 0,31 масс.% в неэкстрагированных образцах и от 0,62 до 0,65 масс.% в образцах после экстракции. Вторая точка перегиба соответствует количеству воды полимолекулярной и мономолекулярной адсорбции совместно — от 0,85 масс.% в неэкстрагированных образцах и от 1,95 до 2,08 масс.% в образцах после экстракции. Суммарное же количество воды моно-, поли- и капиллярной конденсации в этих образцах варьирует от 1,49 масс.% для образцов до экстракции и до 2,94 масс.% после нее.

Содержание свободной воды в этих породах также достаточно близкое — от 0,59 до 0,62 масс.% [Kazak, Kazak, 2019]. В минеральном составе обнаружено некоторое сходство — во всех этих образцах присутствует кварц в большом количестве (от 75 до 83 масс.%), а также гидрослюда, смешанослойные минералы, плагиоклаз и пирит (от 4 до 6 масс.%).

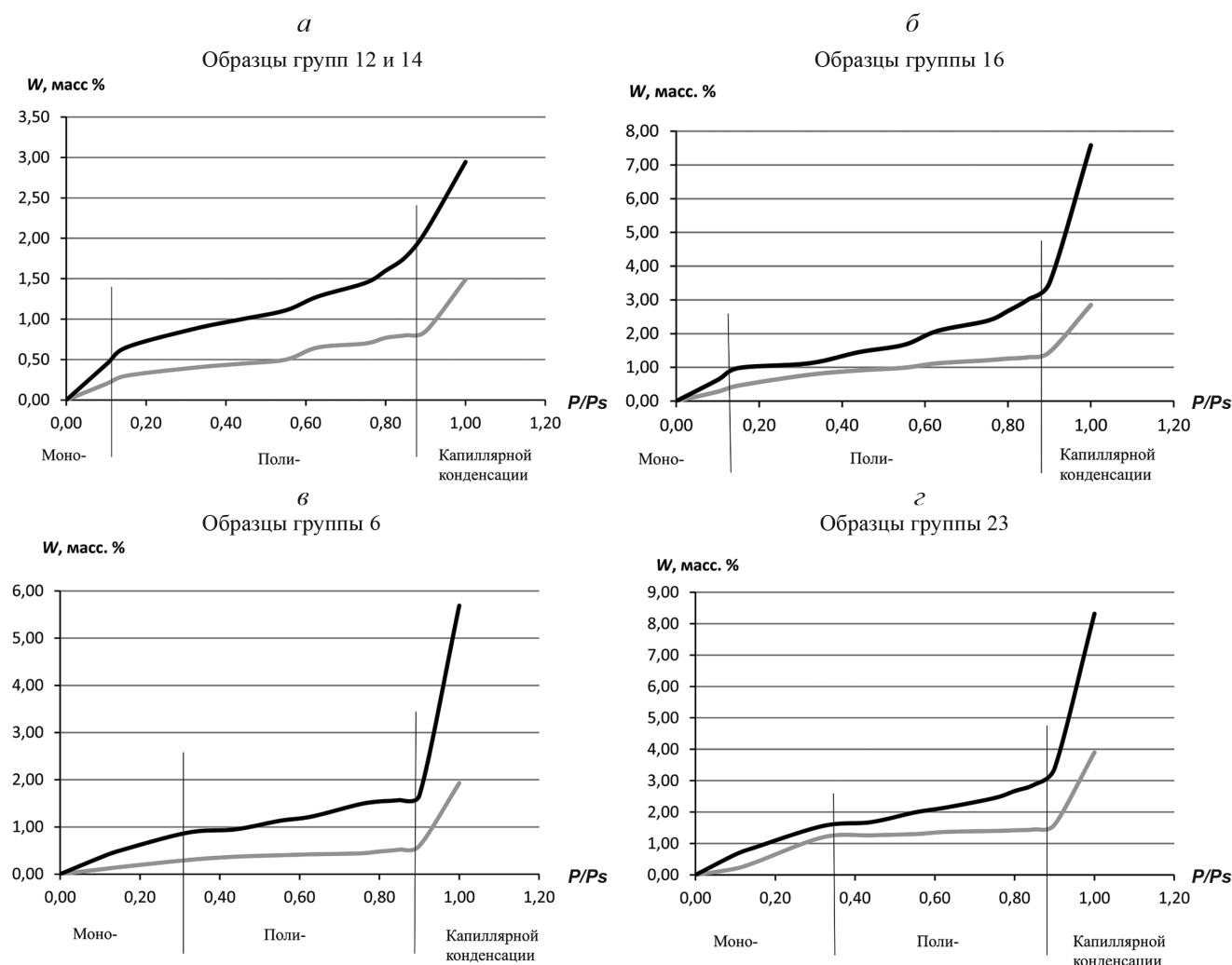


Рис. 2. Общий вид изотермы сорбции паров воды для групп образцов пород баженовской свиты: *а* — группы 12, 14; *б* — группа 16; *в* — группа 6; *г* — группа 23 (черные линии — изотермы сорбции на экстрагированных образцах, серые линии — на природных; вертикальными линиями обозначены зоны мономолекулярной (моно-) адсорбции, полимолекулярной (поли-) адсорбции и капиллярной конденсации)

Количество органического вещества (ОВ) в образцах до экстракции колеблется от 10 до 11 масс.% [Kazak, Kazak, 2019].

Обращает на себя внимание то, что изотермы сорбции имеют схожие форму и количественное содержание различных видов связанной воды в образцах до и после экстракции. Однако после экстракции углеводородов количество связанной воды всех типов в образцах возрастает в 2 раза.

Следующую группу составляют изотермы, полученные на группе образцов 16 (рис. 2, *б*). Полученные изотермы также имеют ярко выраженную S-образную форму с явно обозначенными точками перегиба (при $P/P_s = 0,15$ и $0,9$). Содержание воды мономолекулярной адсорбции в этих образцах составляет от 0,46 масс.% для неэкстрагированных образцов до 0,98 масс.% для образцов после экстракции. Суммарное количество воды полимолекулярной и мономолекулярной адсорбции варьирует от 1,45 масс.% для неэкстрагированных образцов до 3,50 масс.% для образцов после экстракции. Общее же количество воды моно-, поли- и капиллярной кон-

денсации в этих образцах изменяется от 2,85 масс.% для неэкстрагированных образцов до 7,58 масс.% для образцов после экстракции.

Количество свободной воды в этих образцах составляет ~1,35 масс.% [Kazak, Kazak, 2019]. В минеральном составе также есть значительные отличия: количество кварца невелико (22—32 масс.%), присутствуют гидрослюда, смешанослойные минералы, плагиоклаз присутствует в большем количестве, чем в первой группе (обр. 5 и 6), отмечен пирит, а также появляются хлориты (5—7 масс.%), каолинит и кальцит (2—4 масс.%).

Отметим, что в этой группе образцов количество связанной воды в образцах после экстракции углеводородов возрастает более чем в 2 раза, хотя количество ОВ в неэкстрагированной породе невелико и составляет всего 2,45 масс.% [Kazak, Kazak, 2019].

На рис. 2, *в* приведены графики сорбции воды на группе образцов 6. Полученные изотермы неэкстрагированных образцов не имеют ярко выраженной S-образной формы, первая точка перегиба определяется лишь математически и соответствует

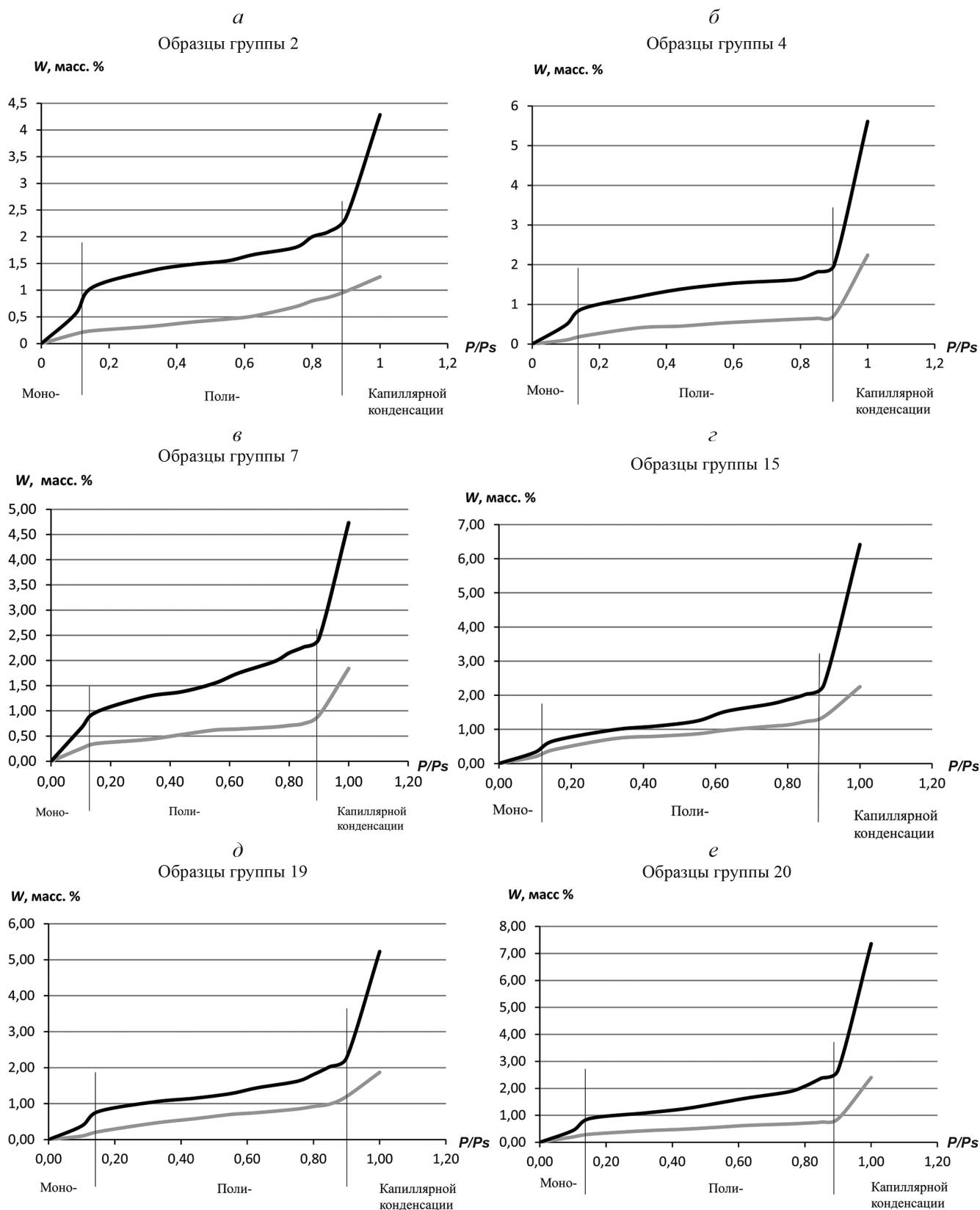


Рис. 3. Общий вид изотермы сорбции паров воды для групп образцов пород баженовской свиты: *а* — группа 2; *б* — группа 4; *в* — группа 7; *г* — группа 15; *д* — группа 19; *е* — группа 20 (черные линии — изотермы сорбции на экстрагированных образцах, серые — на природных; вертикальными линиями обозначены зоны мономолекулярной адсорбции, полимолекулярной адсорбции и капиллярной конденсации)

$P/P_s=0,32$, вторая же точка отчетливо видна на графиках при $P/P_s=0,9$; тогда как в образцах после экстракции на графиках хорошо видны обе точки перегиба, которые также соответствуют $P/P_s=0,32$ и $P/P_s=0,9$ соответственно. Содержание воды мономолекулярной адсорбции в этих образцах составляет 0,30 масс.% для неэкстрагированных образцов и 0,88 масс.% для образцов после экстракции. Вода полимолекулярной и мономолекулярной адсорбции присутствует суммарно в количестве 0,60 масс.% в неэкстрагированных образцах и 1,67 масс.% в экстрагированных образцах. Суммарное же количество воды моно-, поли- и капиллярной конденсации в этих образцах составляет 1,93 и 5,69 масс.% соответственно, т. е. возрастает после экстракции более чем в 2,5 раза.

Количество свободной воды в этих образцах составляет не более 0,25 масс.% [Kazak, Kazak, 2019]. В минеральном составе эти породы достаточно близки: содержание кварца составляет 69 и 59 масс.%, гидрослюд — 8 и 10 масс.%, в значительном количестве в образце 5 отмечены гётит (4 масс.%) и пирит (9 масс.%), а в образце 6 — гётит (7 масс.%), пирит же отсутствует, ОВ содержится в количестве 13 масс.% [Kazak, Kazak, 2019].

Ранее нами были выделены образцы с наименьшим и наибольшим количеством адсорбированной воды [Родькина и др., 2019]. К сожалению, образцы с наименьшим количеством влаги после экстракции не сохранились, однако образцы с наибольшим количеством связанной воды использованы для экспериментов по сорбции и выделению связанной воды различных групп.

Образец 23 как до, так и после экстракции углеводородов отличается максимальными значениями влажностных характеристик (рис. 2, з). Изотермы сорбции также имеют S-образный вид, первая точка перегиба наблюдается ближе к $P/P_s=0,32$. Содержание воды мономолекулярной адсорбции в образцах ненарушенного сложения составляет 1,2 масс.%, а в образцах после экстракции — 1,56 масс.%, количество воды полимолекулярной и мономолекулярной адсорбции суммарно варьирует от 1,6 масс.% в неэкстрагированных образцах до 3,39 масс.% в экстрагированных. Суммарное же количество воды моно-, поли- и капиллярной конденсации в образцах до экстракции практически достигает 4 масс.%, тогда как в экстрагированных образцах оно почти в 2 раза больше (7,3 масс.%).

Количество свободной воды в этих образцах также выше, чем во всех остальных образцах, и составляет 1,87 масс.% [Kazak, Kazak, 2019]. Минеральный состав этого образца принципиально не отличается от такового для группы образцов 16, содержание ОВ в нем составляет 6 масс.% [Kazak, Kazak, 2019].

Данные, полученные для остальных образцов пород, не представляется возможным как-либо систематизировать, но отметим, что все полученные изотермы имеют выраженную S-образную форму,

первая точка перегиба наблюдается в диапазоне P/P_s от 0,15 до 0,23 и определяется или по графику, или математически, вторая точка перегиба практически для всех образцов ярко выражена и фиксируется при $P/P_s=0,9$.

На рис. 3, а приведены изотермы сорбции воды для группы образцов 2, содержание воды мономолекулярной адсорбции содержится в этих образцах составляет 0,24 масс.% для неэкстрагированных образцов и 1,05 масс.% для образцов после экстракции; воды полимолекулярной и мономолекулярной адсорбции суммарно от 0,98 масс.% (определяется математически) до 2,36 масс.% соответственно (четко видно на графиках). Суммарное же количество воды моно-, поли- и капиллярной конденсации в этих образцах составляет 1,25 масс.% для неэкстрагированных образцов и 4,28 масс.% после экстракции. По приведенным данным эта изотерма близка к изотермам, полученным на образцах из групп образцов 5 и 6, однако суммарное количество воды в образцах после экстракции тут значительно выше, оно превышает таковое в неэкстрагированных образцах почти в 4 раза.

Однако свободная вода в этих образцах не обнаружена. В минеральном составе присутствует большое количество кварца (26 масс.%), глинистых минералов (24 масс.%) и пирита (14 масс.%). Содержание ОВ в образцах ненарушенного сложения тут также выше и составляет более 15 масс.% [Kazak, Kazak, 2019].

Содержание воды мономолекулярной адсорбции в группе образцов 4 до экстракции (рис. 3, б) составляет 0,20 масс.%, в образцах после экстракции — 0,89 масс.%. Количество воды полимолекулярной и мономолекулярной адсорбции суммарно определяется по графикам и составляет 0,72 и 1,99 масс.% соответственно. Суммарное же количество воды моно-, поли- и капиллярной конденсации в этих образцах равно 2,24 масс.% для неэкстрагированных образцов и 5,61 масс.% для образцов после экстракции.

В минеральном составе преобладает кварц (78 масс.%), содержатся глинистые минералы (17 масс.%) и пирит (5 масс.%), количество ОВ в образцах значительно превышает таковое во всех остальных группах и составляет около 28 масс.% [Kazak, Kazak, 2019].

Содержание воды мономолекулярной адсорбции в образце 7 (рис. 3, в) составляет 0,35 и 0,97 масс.% соответственно, количество воды полимолекулярной и мономолекулярной адсорбции суммарно — 0,91 масс.% для неэкстрагированных образцов и 2,43 масс.% для образцов после экстракции. Суммарное количество воды моно-, поли- и капиллярной конденсации достигает 1,84 и 4,73 масс.%.

Свободная вода в образце 7 содержится в количестве 0,47 масс.%. В минеральном составе преобладает кварц (37 масс.%), присутствуют гидрослюды (25 масс.%) и смешанослойные минералы

(11 масс.%), количество ОВ невелико и составляет около 3 масс.% [Kazak, Kazak, 2019].

Содержание воды мономолекулярной адсорбции в группе образцов 15 до экстракции составляло 0,40 масс.% и определялось математически (рис. 3, а), в образце после экстракции — 0,66 масс.%. Количество воды полимолекулярной и мономолекулярной адсорбции суммарно равно 1,37 и 2,30 масс.% соответственно, а суммарное количество воды моно-, поли- и капиллярной конденсации — 2,25 и 6,42 масс.%.

В группе образцов 15 свободной воды содержится 0,99 масс.% [Kazak, Kazak, 2019]. В минеральном составе преобладают кварц (49 масс.%) и плагиоклаз (14 масс.%); гидрослюды, смектиты, смешанослойные и каолинит составляют суммарно 28 масс.%, количество ОВ — около 8 масс.% [Kazak, Kazak, 2019].

Содержание воды мономолекулярной адсорбции в группе образцов 19 равно 0,22 масс.% до экстракции и 0,78 масс.% после экстракции углеводородов (рис. 3, б). Количество воды полимолекулярной и мономолекулярной адсорбции суммарно определялось математически для неэкстрагированных образцов (1,20 масс.%); и по графикам для образцов после экстракции (2,27 масс.%). Суммарное количество воды моно-, поли- и капиллярной конденсации составило 1,87 и 5,23 масс.% соответственно.

Содержание свободной воды в образцах соответствует 1,00 масс.% [Kazak, Kazak, 2019]. В образце содержится кварц (28 масс.%), присутствуют плагиоклаз (18 масс.%), кальцит (15 масс.%), полевые шпаты (10 масс.%). Количество гидрослюд, смешанослойных, хлоритов и каолинита составляет 22 масс.%, ОВ содержится в небольшом количестве (~3 масс.%) [Kazak, Kazak, 2019].

В группе образцов 20 количество воды мономолекулярной адсорбции равно 0,30 масс.% для неэкстрагированных образцов (определяется математически) и 0,88 масс.% для экстрагированных (рис. 3, в). Количество воды полимолекулярной и мономолекулярной адсорбции — 0,87 и 2,67 масс.% соответственно, суммарное количество воды моно-, поли- и капиллярной конденсации — 2,40 и 7,36 масс.%.

Свободной воды содержится 0,96 масс.%. В образцах выявлены (масс.%) кварц (53), гидрослюды, смешанослойные и хлориты (16); в составе присутствуют плагиоклаз (до 10), полевые шпаты (9) и пирит (9) [Kazak, Kazak, 2019].

Совпадение форм адсорбционных кривых и особенно совпадение точек перегиба для экстрагированных и неэкстрагированных образцов пород свидетельствует о том, что механизм адсорбции для указанных поверхностей одинаков и что различия между ними состоит только в количестве адсорбированной воды: последней больше в случае экстрагированного образца в соответствии с большим количеством гидрофильных участков поверхности. Анализ полученных кривых подтверждает, что по мере увеличения влажности структура адсорбиро-

ванной воды меняется: мономолекулярный слой сменяется полимолекулярным, образующимся за счет сил притяжения, исходящих от поверхности породы и от внешнего слоя адсорбированных ранее диполей воды.

Так как количество воды в этой тонкой жидкой пленке, состоящей из моно- и полимолекулярных слоев, обусловлено поверхностными силами породы, ее следует отнести к физически связанной или прочносвязанной воде. Относительная влажность, при которой образуется прочносвязанная вода, равна $P/P_s \approx 0,58$ [Гудок и др., 2007]. По мере увеличения указанной влажности влияние поверхности значительно уменьшается. В этой области изменение величины P/P_s изотермы адсорбции начинает резко подниматься вверх, что свидетельствует о появлении нового механизма накопления воды в пустотном пространстве — наступлении процесса капиллярной конденсации. Резкой границы между этими механизмами не существует: в какой-то момент ($P/P_s \approx 0,90$) один механизм взаимодействия полностью начинает преобладать [Гудок и др., 2007].

При накоплении в образце критического объема воды происходит нарушение первоначальной структуры скелета. Опытным показано, что момент расслоения глинистого коллектора под действием расклинивающего давления тонких пленок воды всегда выше $P/P_s = 0,71$, т. е. указанное значение относительной влажности можно считать критическим, при котором еще существует первоначальная структура скелета породы. Итак, зафиксированное при $P/P_s = 0,71$ количество адсорбированной воды соответствует значению величины неснижающейся водонасыщенности, используемой при оценке начальной нефтенасыщенности [Гудок и др., 2007]. Таким образом, значение влажности величины неснижающейся водонасыщенности для исследуемых образцов изменяется от 0,4 до 1,40 масс.% (наиболее распространенное значение 0,69 масс.%).

Кроме того, заметно, что количество гидрофильных участков резко возросло на экстрагированных образцах по сравнению с природными (рис. 4). На рис. 4 представлена фотография экстрагированного образца после эксперимента по сорбции; видно, что образец весь покрыт конденсатом, тогда как природные образцы выглядели абсолютно сухими.

Также авторами статьи получены корреляционные зависимости между значениями коэффициента нефтенасыщенности ($K_{\text{нефт}}$) и водонасыщенности ($K_{\text{вод}}$) и количеством воды, адсорбированным при $P/P_s = 1,00$ (с так называемой максимальной гигроскопичностью, МГ, масс.%), коэффициент корреляции 0,74 (рис. 5). Считается, что максимальная гигроскопичность складывается из трех категорий воды — прочносвязанной, рыхлоосвязанной и свободной — и образована двумя различными процессами — адсорбцией и конденсацией [Гудок и др., 2007].

Заключение. В результате исследований впервые получены изотермы адсорбции воды для об-

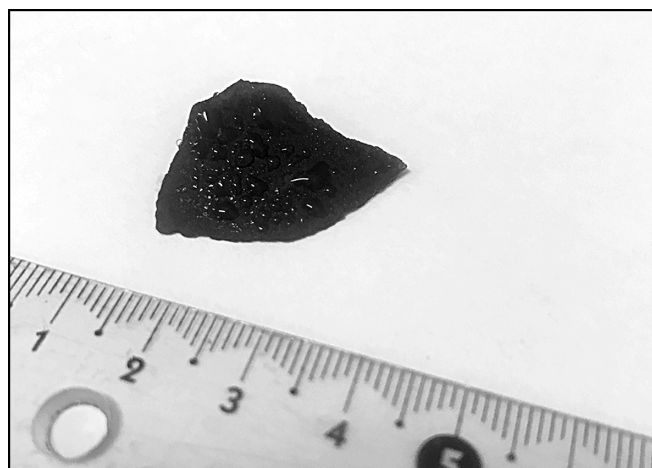


Рис. 4. Фото образца экстрагированных пород БС после эксперимента по сорбции

разцов пород БС после экстракции углеводов в аппарате Закса (рис. 2, 3). Все изотермы имеют хорошо выраженную S-образную форму, что легко (по точкам перегиба) позволяет определить максимально возможное количество связанной воды различных типов — моно-, поли- и капиллярной конденсации. Количество мономолекулярно связанной воды в образцах после экстракции возросло по отношению к образцам до экстракции приблизительно в 2 раза и

составило от 0,5 до 1,0 масс.%; количество моно- и полимолекулярной воды совместно также увеличилось приблизительно в 2 раза (от 2 до 3,5 масс.%; тогда как количество воды моно-, поли- и молекулярной конденсации возросло в 3–4 раза и составило 3–8 масс.%).

По форме изотерм сорбции и количеству связанной воды ранее удалось объединить часть образцов в 4 группы [Родькина и др., 2019]; эти же группы на этих же образцах можно выделить и после экстракции углеводородов.

Для образцов после экстракции можно отметить возрастание показателя смачиваемости горной породы, т. е. увеличение гидрофильных участков по отношению к гидрофобным.

Установлены прямые зависимости между количественным содержанием всей связанной воды или максимальной гигроскопичности в экстрагированных образцах и значениями коэффициентов водо- и нефтенасыщенности.

Полученные новые данные могут стать основой для получения коэффициентов гидрофильности пород БС и определения объемов связанной нефтенасыщенности.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-20120).

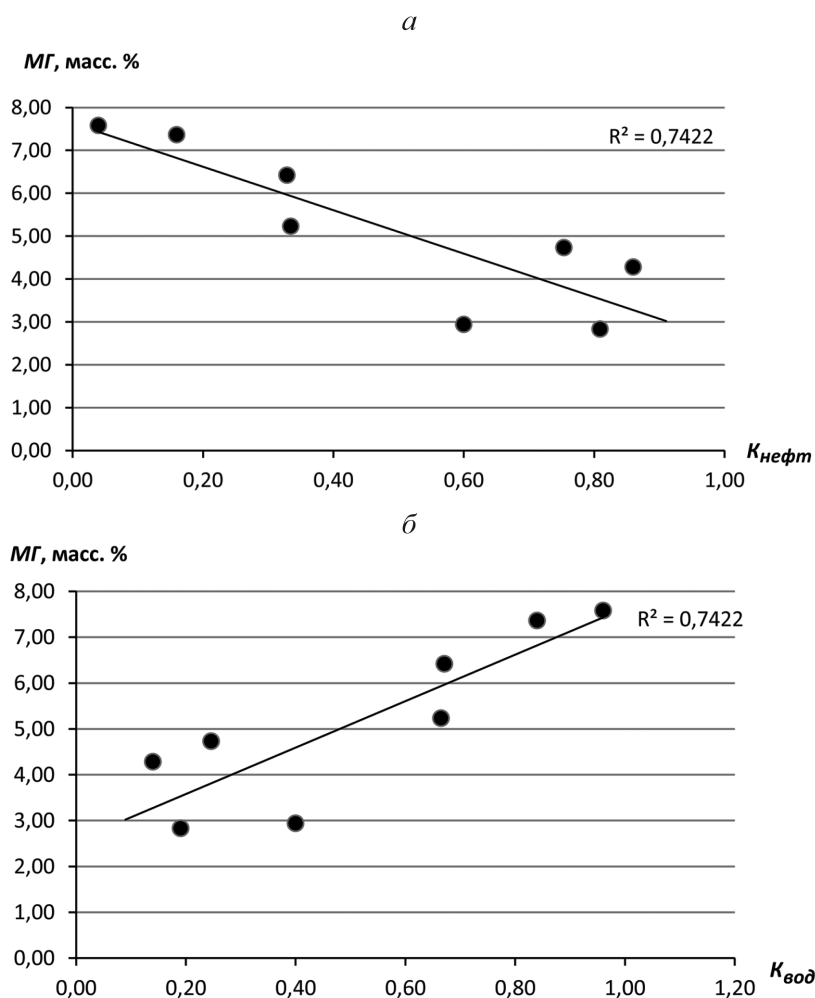


Рис. 5. Зависимость значений коэффициента нефтенасыщенности (а) и водонасыщенности и максимальной гигроскопичности (б) экстрагированных пород БС

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтесодержащих пород. М.: Недра, 2007. 616 с.

Дорофеева Т.В., Краснов С.Г., Лебедев В.А., Петрова Г.В. Коллекторы нефти баженовской свиты Западной Сибири. М.: Недра, 1983. 131 с.

Казак Е.С., Богданович Н.Н., Казак А.В. и др. Оценка содержания остаточной поровой воды и анализ состава водных вытяжек пород баженовской свиты Западной Сибири // Нефтяное хоз-во. 2017. Т. 4. С. 48–52.

Родькина И.А., Казак Е.С. Количественное определение связанной воды в породах баженовской свиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 4. С. 34–45.

Kazak E.S., Kazak A.V. A novel laboratory method for reliable water content determination of shale reservoir rocks // J. Petrol. Sci. and Engineering. 2019. Т. 106301.

Kazak E.S., Kazak A.V. Experimental features of cation exchange capacity determination in organic-rich mudstones // J. Natural Gas Sci. and Engineering. 2020. Т. 83, P. 1–17.

Поступила в редакцию 29.01.2021

Поступила с доработки 25.04.2021

Принята к публикации 27.12.2021