УДК 622

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТАМПОНАЖНОГО СОСТАВА НА МИКРОЦЕМЕНТНОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ВОДОПРИТОКОВ В НЕФТЯНЫЕ И ГАЗОВЫЕ СКВАЖИНЫ

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE WELL PLUGGING MICROCEMENT-BASED COMPOSITION TO LIMIT AND ELIMINATE THE WATER INFLOWS INTO OIL AND GAS WELLS

Д. С. Леонтьев, И. И. Клещенко, А.В. Кустышев, В. А. Долгушин, М. Д. Заватский, А. А. Пономарев

D. S. Leontiev, I. I. Kleschenko, A. V. Kustyshev, V. A. Dolgushin, M. D. Zavatski, A. A. Ponomarev

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: ***тампонажный состав; ОТДВ «Микродур»; математическое планирование эксперимента; полный факторный эксперимент; компьютерная микротомография***

Key words: ***backfill composition; OTDV «Mikrodur»; experiment mathematical planning; full factorial design; computer microtomography***

В настоящее время высокая обводненность добывающих скважин является одной из основных проблем в нефтегазовой отрасли нашей страны. Средний уровень обводненности в России (в том числе и в Западной Сибири) возрастает почти на 2 % в год и в настоящий период превысил отметку 80 %.

Чрезмерно высокий уровень обводненности ведет к снижению рентабельности добычи углеводородов и увеличению их себестоимостей, возрастающим затратам на утилизацию попутно добываемой воды, а самое главное — снижает дебит скважин и конечную нефтегазоотдачу продуктивных пластов. Огромное количество добывающих скважин приходится ликвидировать по причине преждевременного прогрессирующего обводнения [1, 2].

Как известно, такие геологические и технические особенности скважин, как наличие подошвенной (или законтурной) воды, высокопроницаемых пропластков, некачественное цементирование и коррозия обсадной колонны и др., способствуют ускоренному процессу обводнения [1, 2].

На сегодняшний день в мире разработано и запатентовано достаточно большое количество составов и технологий по ограничению и ликвидации притока пластовых вод, однако до конца задача по изоляции водопритоков в нефтяные и газовые скважины не решена.

Как правило, при проведении водоизоляционных работ (ВИР) к тампонажным составам предъявляются следующие требования [3, 4]:

- состав должен обладать хорошей текучестью и сохранять это свойство в процессе закачивания и продавливания в пласт;
- состав должен обладать минимальной водоотдачей с целью предотвращения преждевременного загустевания;
- состав должен быть седиментально стабильным, чтобы в нем в состоянии покоя не образовывались каналы, заполненные дисперсионной средой (водой);
- сопротивление неподвижного раствора фильтрации пластовых вод должно быть по величине не меньше избыточных пластовых давлений, а также перепада давлений между близко расположенными проницаемыми горизонтами в скважине;

- сроки схватывания состава должны легко регулироваться, чтобы начало схватывания смеси превышало время всей операции по закачиванию ее в пласт на 10–15 минут;
- состав должен быть устойчив к пластовым водам, иметь высокие значения структурно-механических свойств;
- состав должен сохранять стабильность в пластовых условиях во время проведения водоизоляционных работ.

Для борьбы с обводнением скважин необходимы такие водоизолирующие материалы, которые способны проникать в пористую среду изолируемых пластов с заполнением всего пористого пространства (в том числе низкопроницаемые коллекторы) с образованием прочного водоизоляционного экрана, устойчивого к вымыванию пластовой водой. В этом случае при проведении ВИР актуальным является применение тампонажного состава на микроцементной основе.

По европейской классификации микроцементом считается цемент с размером частиц менее 20 мкм. Так, известны марки Spinor (Франция), Микроцемент СТ (Финляндия), Интрацем (РФ, РХТУ имени Д. И. Менделеева). Наиболее распространенной маркой микроцемента является особо тонко дисперсное вяжущее (ОТДВ) «Микродур» (Германия, Дюккерхоф).

ОТДВ «Микродур» — это минеральное гидравлическое вяжущее с особо тонким, постоянным и плавно изменяющимся гранулометрическим, а также определенным и стабильным химико-минералогическим составом. ОТДВ «Микродур» изготавливается на основе обычного цементного сырья и состоит из портландцементного клинкера, доменного шлака, регуляторов твердения, минеральных добавок и т. д. [5, 6].

Изначально композиционные материалы на основе ОТДВ «Микродур» применялись для [5, 6, 7]:

- усиления оснований вновь строящихся и существующих зданий и сооружений;
- устройства фундаментов и других заглубленных конструкций разного назначения из закрепленных грунтов;
- увеличения несущей способности свай и других опор большого диаметра путем создания под ними подушек из закрепленного грунта;
- создания противофильтрационных завес в качестве мероприятий по гидроизоляции подземных сооружений и конструкций.

Выпускается 4 марки ОТДВ «Микродур»: S, F, U, X, отличающихся по размерам частиц (таблица 1).

Таблица 1

Характеристики дисперсности суспензии ОТДВ «Микродур»

Марка	Количество частиц с диаметром, %					
	< 2 мкм	< 4 мкм	< 6 мкм	< 9,5 мкм	< 16 мкм	< 24 мкм
S	17	34	49	68	90	95
F	19	45	60	80	95	–
U	25	55	78	95	–	–
X	45	80	95	–	–	–

В настоящее время ОТДВ «Микродур» применяется при строительстве и эксплуатации скважин для ограничения и ликвидации водопритоков. К примеру, профессором Клещенко И. И. (ТИУ) разработан состав, включающий поливиниловый спирт (ПВС), Микродур «U» и гипохлорит кальция $Ca(Cl)_2$ [8]. Паникаровским Е. В. и др. (ТИУ) разработан состав, повышающий изоляцию подошвенных вод, состоящий из «Микродур», сульфацелла, этиленгликоля и воды [9]. Магадовой Л. А. и др. (РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина) разработан компонентный состав из микроцемента ЦС БТРУО Микро, понизителя фильтрации «ПФ-ВМЦ», замедлителя срока схватывания «ЗС-ВМЦ», Пеногасителя «Тесил-201» и воды [10].

Тампонажные составы на основе ОТДВ «Микродур» обладают рядом несомненных преимуществ, а именно [5–7]:

- высокой способностью проникать в трещины и поры размером до 18 мкм и менее;
- седиментационной устойчивостью (седиментация суспензии Вода : «Микродур» = 2 : 1 (по весу), не превышающей 5 %;

- высокой прочностью сформированного тампонажного камня;
- существенным снижением коэффициента фильтрации (с 1х10–4 до 1х10–7 м/с);
- снижением показателей водопроницаемости в результате уплотнения в тысячу раз и более;
- экологической безопасностью;
- экономному расходу материалов.

Авторами также разработан тампонажный состав для ремонтно-изоляционных работ в скважинах на основе ОТДВ «Микродур» марки U, с добавлением полифункционального модификатора и суперпластификатора.

Добавки-модификаторы — вещества, добавляемые в тампонажные растворы с целью изменения одного (или нескольких) параметра раствора при сохранении неизменными остальных параметров. Такие добавки могут быть минерального или техногенного происхождения, а также различные продукты химических производств.

Применяемый полифункциональный модификатор представляет собой комплексный продукт на основе полиметиленнафталинсульфонатов натрия, стабилизирующих веществ с гидрофобизирующими компонентами, обспечивающий повышенные требования по прочности и долговечности получающегося цементного (микродурного) камня. Не содержит веществ, вызывающих коррозию оборудования.

Модификатор с гидрофобными свойствами повышает пластичность микродурного раствора без снижения его прочностных характеристик сформированного тампонажного камня.

Применяемый суперпластификатор представляет собой продукт на основе конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида, не содержит веществ, вызывающих коррозию, обладает стабилизирующим действием.

Суперпластификатор позволяет получать при оптимальных дозировках высокопластифицированные растворы при минимальном значении вода/цемент, позволяет значительно долго сохранить подвижность и однородность растворов. Повышенная степень гидратации при меньшем В/Ц за счет диспергирующего действия позволяет достигать значительных значений прочности.

В предлагаемой авторами разработке набор ингредиентов позволяет получить состав для ремонтно-изоляционных работ в скважинах с высокими технологическими параметрами при изоляции воды в коллекторах любой проницаемости; при креплении слабосцементированных коллекторов в призабойной зоне пласта; при ликвидации заколонных перетоков; при ликвидации притоков подошвенной воды (конуса); при ремонте эксплуатационных колонн и др.

Взаимное влияние компонентов друг на друга, их синергетическое действие в разработанном составе позволяет за счет реакции и отверждения в пластовых условиях образовывать прочный камнеобразный материал.

Разработанный состав можно применять для водоизоляции и крепления коллекторов любой проницаемости, поскольку он закачивается в пласт в виде маловязкого раствора, а образование тампонажного материала происходит непосредственно в пласте, для наращивания цементного кольца в заколонном пространстве скважины, ремонта эксплуатационных колонн и др.

Применение метода математического планирования эксперимента с целью обоснования оптимальной рецептуры водоизоляционной композиции на основе ОТДВ «Микродур».

На современном уровне развития технологии и техники при постановке исследований, направленных на изучение сложных процессов, все большее значение приобретает планирование экспериментов – один из важных разделов математической статистики [11].

Статистические методы планирования экспериментов основательно изменяют методику проведения работ и позволяют ставить опыты по некоторой заранее составленной схеме — одновременно изменять значения всех факторов, результаты опытов рассматривать совместно, а их достоверность оценивать методами математической статистики. Методы планирования экспериментов — это рациональная организация исследовательских работ, сокращение затрат и средств их проведения.

Сначала в плане эксперимента величины влияющих факторов варьируют в узких пределах. После проведения эксперимента анализируют результаты и выбирают математическую модель, которая дает основу для нового этапа экспериментирования.

Применение методов планирования экспериментов, по сравнению с традиционными методами, позволяет повысить эффективность научных исследований в 2–10 раз [11]. Включение в практику инженерных исследований методов рационального экспериментирования позволяет:

- увеличить эффективность работ;
- обеспечить принятие оптимальных решений на различных стадиях исследовательской работы;
- облегчить выбор наилучшей модели среди ряда возможных;
- эффективно оценивать параметры выбранной модели.

Они оказываются эффективными и при прогнозировании показателей и параметров РИР (ВИР). Основное преимущество многофакторных экспериментов заключается в более высокой точности полученных результатов. При планировании экспериментов часто приходится сталкиваться с взаимодействием нескольких факторов. Взаимодействие между двумя факторами означает, что изменение результата на различных уровнях одного фактора не одинаково для всех уровней другого фактора, то есть когда эффект одного фактора зависит от уровня другого, полный факторный эксперимент позволяет количественно оценивать эффект взаимодействия. Число взаимодействия зависит от числа факторов.

Для каждого сочетания факторов на практике проводится ряд опытов. После проведения эксперимента и проверки однородности дисперсий переходят к построению (по результатам опытов) математической модели.

При составлении плана эксперимента требуется найти уравнение регрессии и проверить его адекватность [11].

Если в матрицу (табл. 2) для факторов x_1, x_2 и x_3 вместо значений +1 или –1 поставить соответственно именованные, то получим таблицу с приведенными условиями всех экспериментов.

Таблица 2

Приведенные условия экспериментов

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y
1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	y_1
2	+1	–1	+1	+1	+1	+1	-1	–1	y_2
3	+1	+1	–1	+1	+1	–1	+1	–1	y_3
4	+1	–1	–1	+1	–1	–1	–1	–1	y_4
5	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1	+1	y_5
6	+1	–1	+1	–1	+1	–1	+1	+1	y_6
7	+1	+1	–1	–1	+1	+1	–1	+1	y_7
8	+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	y_8

Здесь эффект взаимодействия x_1, x_2 и x_3 так и называется: эффектом взаимодействия. Полное число всех возможных эффектов, включая b_0, линейные эффекты (эффект фактора — изменение выхода, вызываемое изменением уровня фактора) и взаимодействие всех порядков, равно числу опытов полного факторного эксперимента.

Модель такого эксперимента имеет вид

$$y = b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+b_{23}x_2x_3+b_{123}x_1x_2x_3, \qquad (1)$$

где b_0 — свободный член уравнения; b_1, b_2, b_3 — коэффициенты, характеризующие степень влияния факторов x_1, x_2 и x_3 на величину y; b_{12}, b_{13}, b_{23} — эффекты парного взаимодействия; b_{123} — эффект тройного взаимодействия.

На следующем этапе работы вычисляются коэффициенты уравнения b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}.

Линейные эффекты рассчитываются с учетом данных таблицы 2:

$$b_1 = \frac{(+1)y_1+(-1)y_2+(+1)y_3+(-1)y_4+(+1)y_5+(-1)y_6+(+1)y_7+(-1)y_8}{8}; \quad (2)$$

$$b_2 = \frac{(+1)y_1+(+1)y_2+(-1)y_3+(-1)y_4+(+1)y_5+(+1)y_6+(-1)y_7+(-1)y_8}{8}; \quad (3)$$

$$b_3 = \frac{(+1)y_1+(+1)y_2+(+1)y_3+(+1)y_4+(-1)y_5+(-1)y_6+(-1)y_7+(-1)y_8}{8}. \quad (4)$$

Аналогично рассчитываются остальные коэффициенты уравнения.

Коэффициент b_0 рассчитывается по той же формуле, но во всех случаях берется знак «+».

Эффекты взаимодействия определяются аналогично линейным эффектам. Так, для определения коэффициента b_{12}, необходимо воспользоваться формулой

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_1x_2)_j y_i}{n}, \quad (5)$$

где y_i — параметр оптимизации.

Остальные коэффициенты определяются подобным образом.

После этого проверяется адекватность модели: возможно ли с помощью полученной модели описать изучаемый процесс, то есть является ли найденное уравнение регрессии (данная модель) верным с необходимой точностью или нужно искать уравнение более сложного вида.

Для проверки гипотезы об адекватности можно использовать F — критерий Фишера, суть которого заключается в том, что он сравнивает ошибку отклонения модели от экспериментальных данных с ошибкой эксперимента.

$$F = \frac{\sigma_{\text{ад}}^2}{\sigma_{\text{у}}^2}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{ад}}^2$ — дисперсия адекватности (остаточная дисперсия).

$$\sigma_{\text{ад}}^2 = \sum_{i=1}^{n}\frac{(y_i-y_{iT})^2}{f}, \quad (7)$$

где y_{iT} — значение параметра оптимизации, рассчитанное по уравнению регрессии; f — разность между числом различных опытов и числом параметров уравнения регрессии (средняя дисперсия воспроизводимости).

$$\sigma_{\text{у}}^2 = \sum_{i=1}^{n}\frac{(y_i-\bar{y})^2}{n-1}, \quad (8)$$

где $\bar{y}$ — среднее значение параметра оптимизации.

Анализ найденного уравнения позволяет оценить степень влияния факторов на результативный признак, так как с повышением их важности величина соответствующего коэффициента регрессии должна возрастать.

Знаки коэффициентов свидетельствуют о характере влияния. Если коэффициент имеет «+», то с ростом значения фактора результативный признак увеличивается, а если «–», то уменьшается.

Обработка результатов исследования с применением методики «полного факторного эксперимента».

Рассмотрим изменение величины прочности на изгиб через двое суток твердения сформированного тампонажного камня на основе ОТДВ «Микродур» с применением полифункционального модификатора и суперпластификатора.

Влияние перечисленных факторов рассматривалось в следующих диапазонах: ОТДВ «Микродур» — 48,5–49,2 %, модификатор — 1,0–1,2 %, суперпластификатор — 0,9–1,3, вода — оставшееся.

При составлении плана эксперимента требуется найти уравнение регрессии и проверить его адекватность.

Если в матрицу для факторов x_1, x_2 и x_3 вместо значений +1 или –1 поставить соответственно именованные, то получим таблицу 3, где приведены условия всех экспериментов.

Таблица 3

Условия и результаты экспериментов

№ эксперимента	$n_{ОТДВ\ «Микродур»}$, % (x_1)	$n_{«PFM-ISO»}$, % (x_2)	$n_{«F-10»}$, % (x_3)	Прочность на изгиб через двое суток твердения, МПа (y)
1	49,2	1,2	1,3	3,81
2	48,5	1,2	1,3	4,33
3	49,2	1,0	1,3	2,81
4	48,5	1,0	1,3	2,92
5	49,2	1,2	0,9	3,59
6	48,5	1,2	0,9	3,50
7	49,2	1,0	0,9	3,03
8	48,5	1,0	0,9	3,64

Вода – остальное.

Здесь показан эффект взаимодействия x_1, x_2 и x_3.

На следующем этапе работы вычисляются коэффициенты уравнения b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}.

Линейные эффекты рассчитываются с учетом данных из таблиц 2–3 по формулам (2)–(4).

Эффекты взаимодействия определяются аналогично линейным эффектам. Так, для определения коэффициента b_{12} необходимо воспользоваться формулой (5). Остальные коэффициенты определяются подобным образом.

В результате получено уравнение

$$y = 3{,}45–0{,}14x_1+0{,}35x_2+0{,}01x_3+0{,}04x_1x_2–0{,}01x_1x_3+0{,}25x_2x_3–0{,}14x_1x_2x_3\ . \qquad (9)$$

Значения параметров оптимизации рассчитываются по уравнениям регрессии.

Средняя дисперсия воспроизводимости $\sigma_y^2 = 0{,}1902$.

Так как число экспериментов равно 8, а число оцениваемых параметров — 4, то f=8–4=4. Тогда согласно (7) дисперсия адекватности или остаточная дисперсия $\sigma_{ад}^2 = 0{,}33$.

Согласно (6) критерий Фишера:

$$F = \frac{0{,}33}{0{,}1902} = 1{,}7.$$

При α = 0,05 имеем $f_1 = f = 4$, f_1 = n(m–1) (n — число различных опытов, m — число параллельных опытов). Поскольку параллельных опытов нет, число опытов уменьшается на единицу, то есть $f_2 = 7$ (f_2 — число опытов).

Табличное значение $F_{0,05} = 4{,}12$ (табл. 4). Поскольку 1,7 < 4,12, то модель адекватно описывает исследуемый процесс в выбранных интервалах варьирования факторов.

Таким образом, уравнение прочности на сжатие через 2 суток твердения имеет вид

$$y = 8{,}36–0{,}11x_1+0{,}43x_2+0{,}18x_3–0{,}05x_1x_2–0{,}09x_1x_3+0{,}24x_2x_3–0{,}14x_1x_2x_3. \qquad (10)$$

Аналогично рассматриваем влияние этих же компонентов исследуемых тампонажных растворов на другие параметры. Все полученные модели уравнения являются адекватными.

Уравнение прочности на изгиб через 7 суток твердения:

$$y = 7{,}15–0{,}15x_1+0{,}43x_2+0{,}01x_3+0{,}04x_1x_2–0{,}03x_1x_3+0{,}29x_2x_3–0{,}15x_1x_2x_3.$$

Уравнение прочности на изгиб через 28 суток твердения:

$$y = 7{,}7–0{,}16x_1+0{,}48x_2+0{,}02x_3+0{,}05x_1x_2–0{,}03x_1x_3+0{,}32x_2x_3–0{,}15x_1x_2x_3.$$

Таблица 4

Значения критерия Фишера (F-критерия) для уровня значимости α = 0,05

	f_1										
f_2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88	245,95
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,43
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,70
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,86
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,62
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	3,94
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,51
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,22
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,01
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,85
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,72
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,62
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,53
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,46
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,40
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,35
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,31
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,27
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,23
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,20

Уравнение прочности на сжатие через 2 суток твердения:

$$y = 8{,}36–0{,}11x_1+0{,}43x_2+0{,}18x_3–0{,}05x_1x_2–0{,}09x_1x_3+0{,}24x_2x_3–0{,}14x_1x_2x_3.$$

Уравнение прочности на сжатие через 7 суток твердения:

$$y = 14{,}35–0{,}2x_1+1{,}45x_2+0{,}13x_3+0{,}28x_1x_2+0{,}02x_1x_3+0{,}64x_2x_3–0{,}44x_1x_2x_3.$$

Уравнение прочности на сжатие через 28 суток твердения:

$$y = 16{,}36–0{,}21x_1+1{,}55x_2+0{,}1x_3+0{,}29x_1x_2+0{,}03x_1x_3+0{,}68x_2x_3–0{,}33x_1x_2x_3.$$

Уравнение плотности:

$$y = 1432{,}5–55x_2–2{,}5x_2x_3.$$

Результаты экспериментальных лабораторных исследований тампонажного раствора на основе ОТДВ «Микродур» представлены на рисунках 1–3.

Результаты исследований компьютерной микротомографии тампонажного камня на основе ОТДВ «Микродур».

Компьютерная микротомография или микро-КТ — это реконструкция бинарных моделей рентгеновских изображений в трехмерное пространство.

Методика исследований заключалась в следующем: образец тампонажного камня устанавливался в сканер, на предметный столик, который в ходе сканирования вращался, в этот момент через образец проходили рентгеновские лучи, испускаемые источником и оставляли на приемнике (камере) теневые проекции. При каждом повороте фиксировалась отдельная проекция (отдельное двумерное изображение, отвечающее интенсивности рентгеновского излучения после прохождения последнего через изучаемый образец, называется теневой проекцией) [12, 13].

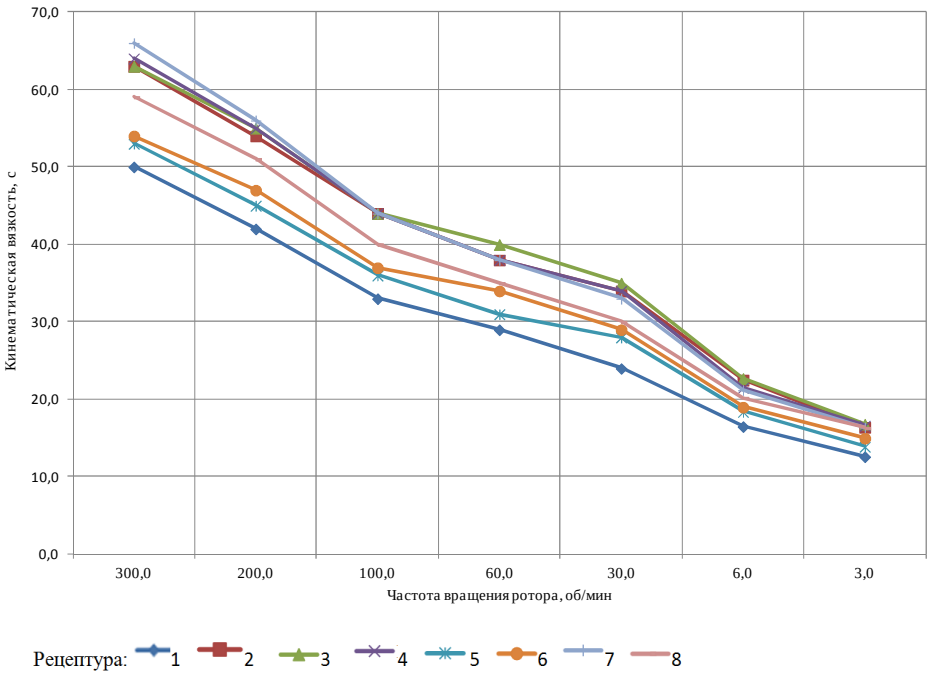


Рис.1. ***График зависимости пластических вязкостей рецептур от частот вращения ротора (вискозиметр Model 900)***

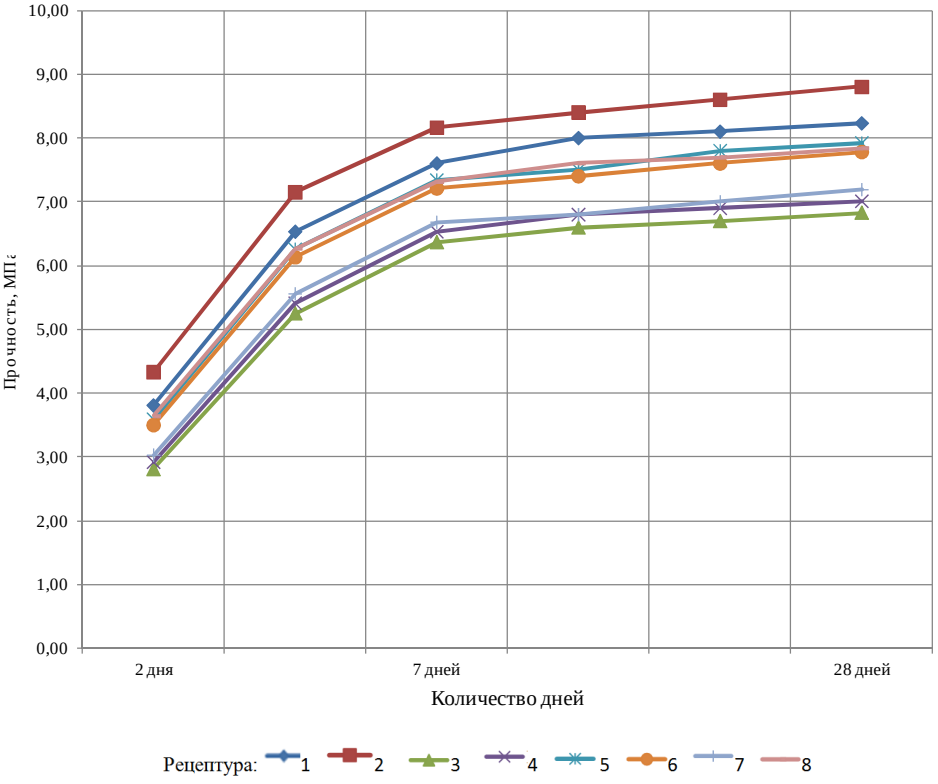


Рис. 2. ***График результатов испытаний прочности на изгиб сформированных тампонажных камней (2 суток твердения)***

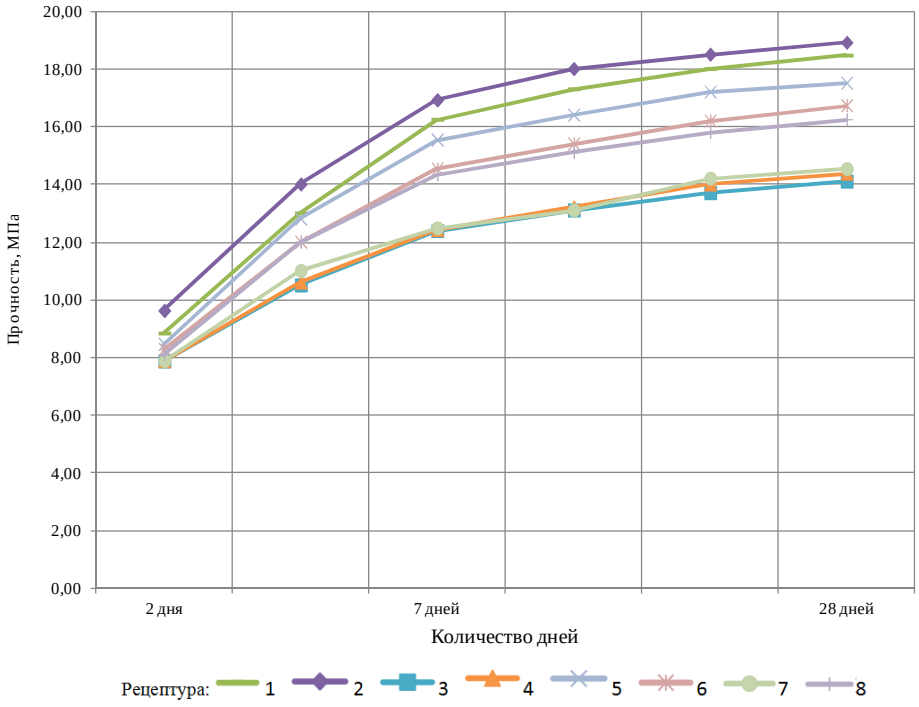


Рис. 3. ***График результатов испытаний прочности на сжатие сформированных тампонажных камней (2 суток твердения)***

Яркость (различные градации серого) на рентгеновской теневой проекции отражает ослабление рентгеновского излучения за счет эффектов рассеивания и поглощения сигнала, прошедшего через образец.

Ослабление будет зависеть от плотности и толщины изучаемого объекта, а также от эффективного атомного номера (Zэф), из которого состоит исследуемый образец. Описывается этот эффект законом Ламберта — Бера, определяющим ослабление монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде. Закон выражается формулой

$$I(x) = l_0 e^{(-\mu x)}, \tag{11}$$

где l_0 — начальная интенсивность ренгеновского излучения; x — толщина слоя вещества, через которое проходит излучение; μ — показатель поглощения среды.

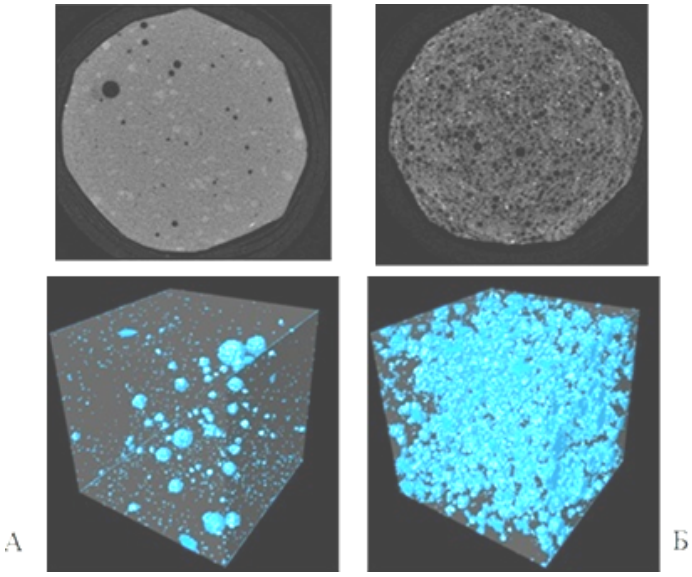
В большинстве метод компьютерной микротомографии применяют для исследования ФЕС горных пород (изучение порового пространства и текстурных характеристик) [12].

Изучение порового пространства методом компьютерной томографии тампонажного камня на основе ОТДВ «Микродур» предложено лично авторами.

Используемое оборудование для проведения анализа по микротомографии: Skyscan 1172 со стандартным пакетом программ (Nrecon, CTan, Ctvol, Data Viewer). Данные образцы снимались при одинаковых режимах сканирования: напряжение — 100 kV, сила тока — 100 um, оптимальное разрешение для образцов было выбрано 3,95 мкм/pxl. Параметры реконструкции также были одинаковы. В связи с тем, что реконструированные данные достаточно объемные и тяжелые для анализа на стандартном компьютере, идущем в комплекте с прибором, было принято решение вырезать из образца кубики с размером ребра 2 мм для оптимизации анализа и 3D-моделирования структуры порового пространства цементов.

На рис. 4 представлены результаты исследований тампонажного камня на основе ОТДВ «Микродур» и обычного цемента (ПЦТ-100) через двое суток твердения методом компьютерной микротомографии.

Рис. 4. ***Результаты исследований тампонажного камня на основе ОТДВ «Микродур» и обычного цемента (ПЦТ-100) через двое суток твердения методом компьютерной микротомографии (А — тампонажный камень на основе ОТДВ «Микродур»; Б — тампонажный камень на основе ПЦТ-100)***



Таким образом, анализ полученных результатов исследований тампонажных камней на основе ОТДВ «Микродур» и ПЦТ-100 методом компьютерной микротомографии через двое суток твердения показал, что пористость тампонажного камня на основе ОТДВ «Микродур» в несколько раз меньше, и она почти вся закрытая, распределение пор по размерам получается также меньше, чем у тампонажного камня на основе ПЦТ-100.

Список литературы

1. Демахин С. А. Химические методы ограничения водопритока в нефтяные скважины: учебник / С. А. Демахин, А. Г. Демахин. – М.: Недра, 2010. – 198 с.
2. Григулецкий В. Г. Обводнение месторождений — коренной вопрос современности российской нефтегазовой отрасли // Технологии ТЭК. – 2007. – № 4. – С. 14-16.
3. Клещенко И. И. Изоляционные работы при заканчивании и эксплуатации нефтяных скважин: монография / И. И. Клещенко, А. В. Григорьев, А. П. Телков. – М.: Недра. – 1998. – 267 с.
4. Клещенко И. И. Теория и практика ремонтно-изоляционных работ в нефтяных и газовых скважинах: учебное пособие / И. И. Клещенко, Г. П. Зозуля, А. К. Ягафаров. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 2010. – 340 с.
5. Панченко А. И., Харченко И. Я. Особо тонкодисперсное минеральное вяжущее «Микродур»: свойства, технология и перспективы использования // Строительные материалы. – 2005. – № 10. – С. 76-78.
6. Байдаков О. С. Применение материалов «Mikrodur» для инъекционных работ при укреплении грунтов и усилении конструкций // Метро и тоннели. – 2005. – № 6. – С. 34-38.
7. Алексеев С. В. Микродур — инъекционное минеральное вяжущее и опыт его применения / Международная научно-техническая конференция «Технологии, оборудование, материалы, нормативное обеспечение и мониторинг для тоннельного строительства и подземных частей высотных зданий». – М.: Тоннельная ассоциация России, 2006. – С. 198-200.
8. Пат. 2326922 РФ. C09K 8/504. Состав для ремонтных работ в скважинах / И. И. Клещенко, С. К. Сохошко, Е. В. Паникаровский, Н. А. Шестакова, К. Н. Щербич, Г. П. Зозуля. (РФ). – № 2006134101/03, заяв. 25.09.06; опубл. 20.06.08, бюл. № 17.
9. Пат. 2456431 РФ. E 21 B 33/13. Способ изоляции водопритока / Е. В. Паникаровский, В. В. Паникаровский, В. А. Шуплецов, И. В. Горлов, А. А. Кузьмин, В. В. Паникаровский, В. П. Бакланов. (РФ). – № 2010154750/03, заяв. 30.12.10; опубл. 20.07.12, бюл. № 20.
10. Магадова Л. А., Ефимов Н. Н., Елисеев Д. Ю., Ефимов М. Н., Козлов А. Н. Способы повышения качества тампонажных растворов на основе микроцементов для ремонтно-изоляционных работ: материалы XV Международной научно-практическая конференции «Эфиры целлюлозы и крахмала, другие новые химические реагенты и композиционные материалы как основа успешного сервиса и высокого качества технологических жидкостей для строительства, эксплуатации и капитального ремонта нефтяных и газовых скважин». – Суздаль, 2011. – С. 208–211.
11. Башкатов Д. Н. Планирование эксперимента в разведочном бурении. – М.: Недра, 1985. – 181 с.
12. Пономарев А. А., Заватский М. Д. Методы применения компьютерной микротомографии в геологии // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. –2015. – № 3. – С. 29-33.
13. Леонтьев Д. С., Пономарев А. А. Результаты исследования порового пространства тампонажного камня на основе микроцемента методом компьютерной микротомографии // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 5. – С. 52-60.
14. Леонтьев Д. С., Пономарев А. А. Возможность применения компьютерной микротомографии как инструмента оценки качества тампонажного камня // Нефть и газ Западной Сибири: материалы международной научно-технической конференции. Т. 4. Бурение нефтяных и газовых скважин, машины и оборудование промыслов. Материалы и технология нефтяного машиностроения. Химия, нефтехимия и технология переработки нефти и газа / ТюмГНГУ; отв. ред. П. В. Евтин. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 10-13.

Сведения об авторах

Леонтьев Дмитрий Сергеевич, *аспирант, ассистент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)200989, e-mail: leonfob@mail.ru.*

Клещенко Иван Иванович, *д .г.-м. н., профессор РАЕН, профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Тюменский индустриальный университет, тел. 8(3452)200989, e-mail: leonfob@mail.ru*

Кустышев Александр Васильевич, *д. т. н., профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин» Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)200989, e-mail: kustishev@tngg.info.*

Долгушин Владимир Алексеевич, *к. т. н., и. о зав. кафедрой «Бурение нефтяных и газовых скважин», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)200989, e-mail: rado25@yandex.ru*

Заватский Михаил Дмитриевич, *к. г.-м. н., доцент кафедры «Геология месторождений нефти и газа», заведующий учебно-научной геохимической лаборатории, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89222670591, e-mail: eksis2005@yandex.ru*

Пономарев Андрей Александрович, *лаборант учебно-научной геохимической лаборатории, специалист по вопросам компьютерной микротомографии, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89829313122, e-mail: ponomarev94@mail.ru.*

Information about the authors

Leontiev D. S*., postgraduate, assistant of the chair «Drilling of oil and gas wells», Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)200989, e-mail: leonfob@mail.ru*

Kleschenko I. I., *Doctor of Geology and Mineralogy, professor of RAEN, professor of the chair «Drilling of oil and gas wells», Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)200989, e-mail: leonfob@mail.ru*

Kustyshev A. V*., Doctor of Engineering, professor of the chair «Drilling of oil and gas wells», Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)200989, e-mail: kustishev@tngg.info.*

Dolgushin V. A*., Candidate of Science in Engineering, deputy head of the chair «Drilling of oil and gas wells», Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)200989, e-mail: rado25@yandex.ru*

Zavatski M. D*., Candidate of Science in Geology and Mineralogy, associate professor of the chair «Geology of oil and gas fields», head of training and research geochemical laboratory of Industrial University of Tyumen, phone: 89222670591, e-mail: eksis2005@yandex.ru*

Ponomarev A. A*., lab assistant of the training and research geochemical laboratory, expert in computer tomography, Industrial University of Tyumen, phone: 89829313122, e-mail: ponomarev94@mail.ru.*