

О ПОВЫШЕНИИ ДОСТОВЕРНОСТИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГОРНЫХ ПОРОД

В.П. Митрофанов, А.А. Злобин
(ООО «ПермНИПИнефть»)

Гранулометрический состав терригенных пород является одной из важнейших характеристик, знание которой необходимо при решении различных исследовательских и практических вопросов. К ним относятся: классификация обломочных пород, оценка песчано-алевритовых пород как коллекторов нефти и газа, достоверная интерпретация материалов ГИС и геологическое моделирование, реконструкция генезиса осадков при палеоструктурных построениях и др. Для выполнения всех этих задач необходим достоверный гранулометрический анализ пород. Наиболее распространенным на практике является метод отмучивания и ситового отсева, который прост в исполнении и экономичен. Однако его точность и информативность низкие, поскольку он позволяет выделять ограниченное число дискретных классов зернистости. Как подчеркивается в специальной литературе [1], гранулометрический анализ давно нуждается в кардинальной модернизации.

Для повышения одновременно точности и экспрессности в практику стандартного определения гранулометрического состава предлагается внедрить метод лазерного дифракционного микроанализа на базе прибора «Analysette-22» фирмы FRITSCHE. Прибор работает на основе оптического сходящегося лазерного луча и принципа рассеивания электромагнитных волн от взвешенных в жидкости частиц. Лазерный луч сканирует всю пробу и отклоняется на определенный угол в зависимости от диаметра и оптических свойств частиц. Собирающая линза фокусирует рассеянный свет в фокальной плоскости и далее детектор регистрирует спектр Фурье. Расчет функции распределения частиц по размерам проводится на основе теории Фраунгофера или теории Ми. Успешную апробацию прибор прошел на примере кварцевых песчаников и алевритов различной глинистости как с фильной, так и с фобной поверхностью зерен. Технические характеристики установки приведены в табл. 1.

Следует отметить некоторые конструктивные особенности прибора и программного обеспечения: большой диапазон измерения размеров частиц (0,1...1250 мкм) без замены оптических элементов и

Для повышения информативности гранулометрического состава терригенных пород рекомендуется метод лазерного дифракционного анализа на базе прибора «Analysette-22», предназначенного для исследований сыпучих искусственных материалов. Данный метод определения гранулометрического состава, апробированный на представительном количестве образцов, рассматривается как наиболее перспективный при решении широкого круга вопросов нефтяной геологии.

For increasing of informativity of grade composition of terrigenous rocks it is recommended method of laser diffraction analysis on the base of the instrument «Analysette 22», which is used for research of friable forced materials. This method of grain composition determining, approbated on representative quantity of samples, is looking out as more perspective for solving of the wide range of questions of oil geology.

отсутствие докостировки оптической системы; автоматическую прецизионную установку фиксирующей ячейки в процессе измерений, отделение от корпуса повышенной устойчивости 3-точечной подвески оптической скамьи, большое разрешение для специальных научных исследований, возможность быстрой разборки проточной оптической ячейки, автоматическую промывку и заполнение ванны, безопасность и простоту в работе. Програ-

ма математической обработки обеспечивает непрерывный расчет размера зерен и выдачу графиков в интегральном и дифференциальном видах, а также полную статистику по любым выборочным классам зернистости (среднее арифметическое, геометрическое, гармоническое, мода, медиана, коэффициенты сортировки, асимметрии и др.) и пересчет в другие виды анализов.

На стадии оценки возможности использования прибора для решения практических и научных задач в нефтяной геологии было исследовано 203 пробы дезинтегрированных образцов. В итоге разработана и апробирована методика, адаптированная к проведению экспериментов по определению гранулометрического состава терригенных пород на микроанализаторе «Analysette-22» (А-22). Необходимо иметь в виду, что прибор изначально был предназначен для

Таблица 1

Технические характеристики лазерного дифракционного микроанализатора «Analysette-22»

Характеристики	Значение параметра
Диапазон измерения, мкм	0,1...1250
Тип лазера	Гелий-неоновый (HeNe), класс защиты 1
Длина волны, нм	632,8
Мощность лазера, мВт	5
Масса пробы, г	0,2...1,0
Объем жидкости в ванне, л	0,4
Мощность УЗК-диспергатора, Вт	0...150
Число каналов разрешения	31...310
Длительность измерения, мин	2
Система управления и расчета	Автоматическая с ПК под управлением ОС WINDOWS
Интерфейс	Параллельный порт RS232, 12-битная плата расширения для ISA слота

анализа однородных по составу искусственных сыпучих сред.

Методика гранулометрического анализа пород включает следующие операции:

- отбор образца породы объемом до 50 см³;
- экстрагирование образцов в случае нефте-насыщенных пород;
- дезинтегрирование образца до частиц размером 5...6 мм;
- мокрое растирание пробы пестиком до размера порообразующих частиц;
- просеивание пробы через сито с ячейками 2×2 мм;

горячую обработку пробы в 5%-м растворе HCl;

помещение отквартованной и высушенной навески пробы (10 г) в бюкс с дистиллированной водой;

насыщение пробы в течение 1 ч водой под вакуумом, не ниже 10⁻³ мм рт. ст. (без такой обработки мелкие и гидрофобные частицы в диспергирующей ванне плавают на поверхности воды);

включение установки А-22, активизацию компьютерной программы, запуск мешалки и ультразвука;

проверку юстировки лазера (в случае необходимости производится регулировка);

установку измерительного диапазона;

ввод номера пробы и текстового комментария к эксперименту;

измерение начального нулевого фона в ячейке без пробы;

добавление исследуемой пробы малыми порциями в диспергирующий блок до получения рабочей степени поглощения (оптимальное значение 9...11 %);

измерение размеров частиц пробы;

автоматический слив жидкости, промывку диспергирующего устройства и заливку воды в ванну;

редактирование и печать результатов анализа.

Для периодического контроля качества работы аппаратуры имеется специальный тест с использованием стандарта — порошкообразного вещества с известными характеристиками, рассчитанными фирмой FRITSCH при определенных условиях эксперимента (измерительный диапазон — 190 мкм, скорость насоса — 85 %, скорость мешалки — 50 %, мощность ультразвука — 100 %, коэффициент поглощения — 13 %). В наших экспериментах, в частности, использовался прилагаемый фирмой стандарт BCR 69 № 1517. В табл. 2 приведены экспериментальные данные о размерах частиц тест-стандарта и сравнение их с эталонными. Тест включает сравнение размеров частиц в трех точках интегральной кривой на уровне 10 % (d10), 50 % (d50) и 90 % (d90).

Анализ таблицы показывает, что экспериментальные измеренные размеры частиц попадают в доверительный интервал, что свидетельствует о надежной

Таблица 2

Данные тест-стандарта BCR 69 № 1517, полученные на микроанализаторе «Analysette-22»

Уровень	Минимальный размер, мкм	Максимальный размер, мкм	Доверительный интервал (Δ), мкм	Экспериментальный размер, мкм
d10	17,1	20,1	3,0	18,1
d50	38,2	42,5	4,3	38,6
d90	79,9	96,0	16,1	80,1

Таблица 3

Результаты воспроизводимости среднего диаметра, полученные на микроанализаторе «Analysette-22»

Номер опыта	Средний арифметический, мкм	Модальный, мкм	Медианный, мкм	Содержание фракции 40 мкм, %
1	42,098	34,779	38,224	65,43
2	41,524	34,779	37,657	65,74
3	41,688	34,799	38,200	64,89
Средняя относительная ошибка, %	0,503	0,0	0,649	0,473

работе установки. При этом в стандарте для всех размеров частиц доверительный интервал по содержанию фракций одинаков и составляет 7 % (±3,5 %). Однако тест не дает информации о реальной воспроизводимости данных. Для этого была выбрана отдельная проба (Чернушинское месторождение, скв. 225, обр. 66), на которой произведено три последовательных измерения кривой гранулометрического состава без изменения начальных условий эксперимента (табл. 3).

Как видим, для всех приведенных параметров и по размеру, и по содержанию фракции средняя ошибка меньше 0,7 %, что отражает надежный уровень анализа гранулометрического состава по динамической картине волнового поля. Высокая точность измерения позволяет проводить «прецизионные» литологические исследования, в принципе недоступные другим грубым методам, например, определять динамику вариаций отдельных узких классов (полос) генетических размерностей зернистого минерала по площади и в разрезе пласта.

В связи с тем что все графические и текстовые материалы отчета по эксперименту на установке А-22 представлены только в английском варианте, авторами были разработаны новая структура и форма выдачи данных на русском языке. Для построения графиков первичный массив данных вначале экспортируется в пакет Excel и далее вставляется в специально разработанный шаблон. Деление различных фракций терригенных пород по величине обломочного материала произведено в соответствии с классификацией Л.Б. Рухина [2]: глинистая мелкопелитовая (Гл м/п) — <0,001 мм, глинистая крупнопелитовая (Гл к/п) — 0,01...0,10 мм, алевроитовая мелкозернистая (А м/з) —

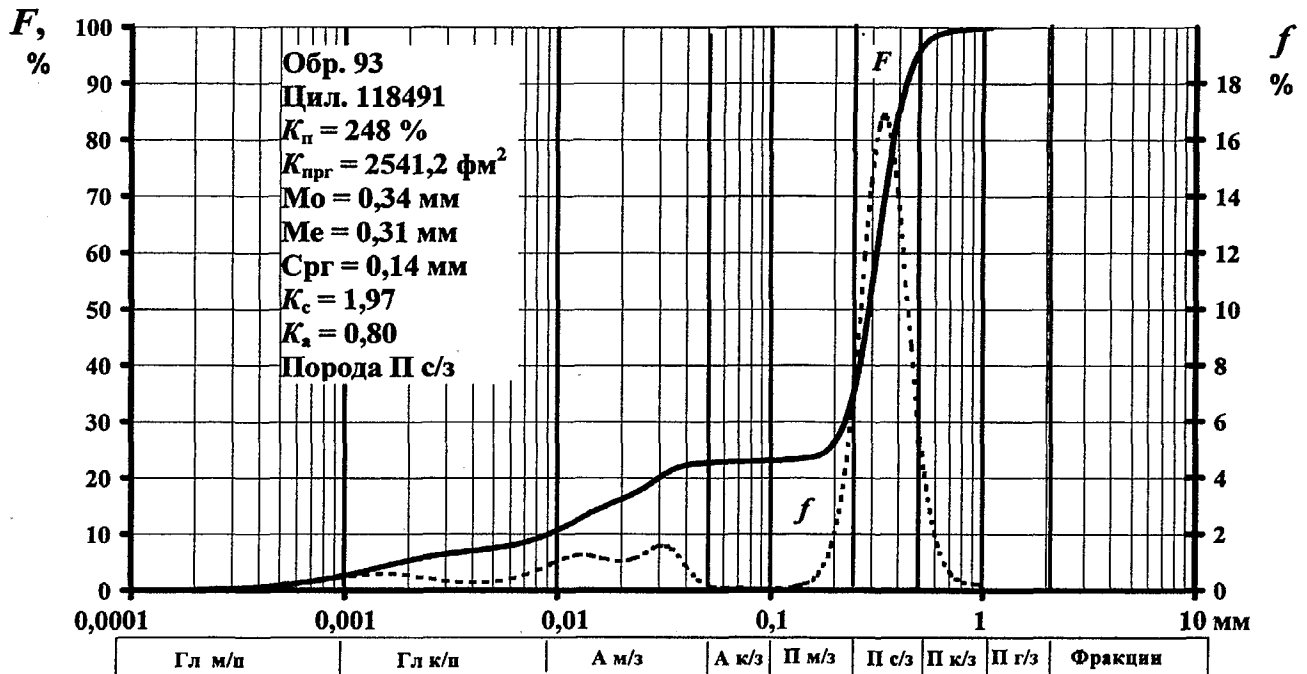


Рис. 1. Дифференциальное (f) и интегральное (F) распределения гранулометрического состава (обр. 93, скв. 203, Бородинское месторождение)

0,01...0,05 мм, алевритовая крупнозернистая (А к/з) — 0,05...0,10 мм, песчаная мелкозернистая (П м/з) — 0,10...0,25 мм, песчаная среднезернистая (П с/з) — 0,25...0,50 мм, песчаная крупнозернистая (П к/з) — 0,5...1,0 мм, песчаная грубозернистая (П г/з) — >1,0 мм.

Данные анализа гранулометрического состава обрабатывались в виде дифференциальных (f) и интегральных (F) распределений, на основании которых оценивались усредненные параметры обломочного материала в целом:

- модальное значение (M_o), соответствующее максимуму на кривой f ;
- медианное значение (M_e), соответствующее 50 % на кривой F ;
- среднегеометрическое значение ($C_{прг}$), рассчитываемое по формуле

$$C_{прг} = \sum n_i \cdot \lg \bar{d}_i / \sum n_i,$$

где n_i — доля фракции, \bar{d}_i — средний диаметр зерен; — коэффициент сортировки (K_c) определяли по формуле

$$K_c = Q_3 / Q_1,$$

где Q_3 и Q_1 — квантили размерности на кривой F соответственно при 75 и 25 % (при $K_c = 1,0...2,5$ сортировка считается хорошей, при $K_c = 2,5...4,5$ — средней, при $K_c > 4,5$ — плохой);

— коэффициент асимметрии модальной величины относительно медианной (K_a) находили по формуле

$K_a = Q_3 \cdot Q_1 / (M_e)^2$ (при $M_o < M_e$ величина $K_a > 1$, при $M_o > M_e$ $K_a < 1$).

На рис. 1 и 2 в качестве примера приведены графики гранулометрического анализа для двух проб образцов пород Бородинского месторождения, скв. 203. Для первого образца (обр. 93) модальное значение размера зерен составляет 340 мкм, а для второго образца (обр. 47) — 30 мкм. Такие графики позволяют быстро идентифицировать тип породы с учетом наиболее представительной фракции гранулометрического состава. В первом случае проба соответствует песчанику среднезернистому, во втором — алевролиту мелкозернистому. В табл. 4 в качестве примера представлена структура выходных данных. Гранулометрический состав, полученный с помощью «Analysette-22», в данном случае пересчитан в традиционно используемые фракционные группы обломочных пород по ситовому анализу. Дополнительно расширены лишь два граничных класса в области пелитовой фракции (<0,001) и крупнозернистой (> 1 мм). В табл. 5 для двух образцов приведено сравнение содержаний фракций по данным ситового анализа и лазерного микроанализатора.

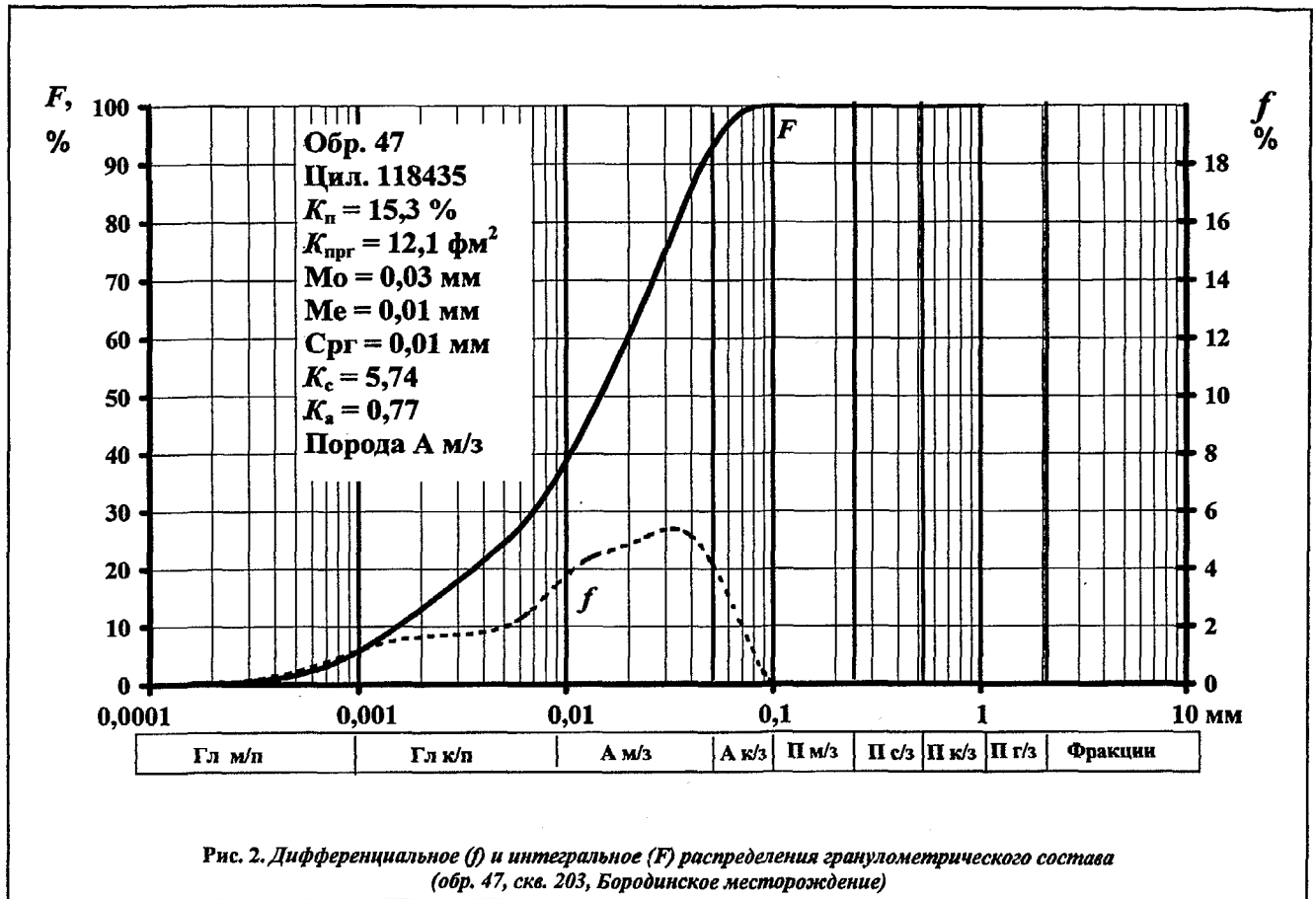
Результаты сравнения показывают, что в целом наблюдается достаточно хорошее совпадение данных двух различных по физической сути методов — контактного и бесконтактного. Основное отличие гранулометрического состава по методу лазерного анализа заключается в следующем: крупнозернистой песчаной

Таблица 4

Данные granulометрического состава и карбонатности терригенных образцов (скв. 203), полученные на лазерном микроанализаторе «Analysette-22»

Номер образца	Глубина, м	Порода	№ цилинд.	Пористость (K_n), %	Проницаемость ($K_{пр}$), дм^2	Содержание фракций, %								Карбонатность (S_a), %	Размер зерен, мм			Коэффициенты	
						> 1, мм П г/з	1...0,5, мм П к/з	0,5...0,25, мм П с/з	0,25...0,1, мм П м/з	0,1...0,05 мм А к/з	0,05...0,01 А м/з	0,01...0,001 Гл к/п	< 0,001 Гл м/п		модальный (Mo)	медианный (Me)	геометрический (Crg)	сортировки (K_s)	асимметрии (K_a)
Бородинское месторождение																			
47	443,5...1449	А м/з	118435	15,3	12,1	—	—	—	—	9,5	53,8	31,5	5,1	—	0,03	0,01	0,01	5,74	0,77
50	443,5...1449	П м/з	118439	21,2	1160,1	—	—	1,9	70,5	9,5	9,6	6,9	1,5	—	0,14	0,13	0,08	1,79	0,85
54	449,0...1456	П м/з, А м/з	118445	21,0	601,0	0,1	0,6	9,4	28,0	3,5	28,7	23,2	6,4	—	0,19	0,03	0,03	23,46	1,75
57	449,0...1456	П м/з	118449	22,2	1109,6	—	—	0,9	54,2	11,1	18,4	11,6	3,7	—	0,14	0,10	0,05	6,22	0,30
59	449,0...1456	П м/з, А к/з	118450	20,9	425,1	—	—	—	48,9	30,7	10,3	7,9	2,1	—	0,11	0,10	0,06	1,93	0,85
65	449,0...1456	П м/з, А к/з, м/з	—	—	—	—	—	—	20,7	27,0	24,8	22,2	5,3	—	0,10	0,04	0,02	11,04	0,47
66	449,0...1456	П м/з	118455	21,2	1003,8	—	—	0,9	76,8	11,2	4,6	5,1	1,4	—	0,14	0,13	0,09	1,55	0,95
70	449,0...1456	П м/з	118461	20,4	1038,2	—	—	1,6	58,6	11,2	15,1	9,2	4,3	—	0,10	0,10	0,06	4,47	0,40
75	449,0...1456	П м/з	118469	24,4	1046,9	—	0,1	2,6	59,5	9,5	10,8	13,1	4,3	—	0,10	0,10	0,06	4,99	0,35
80	456,5...1463	А м/з	118475	7,7	4,89	—	—	—	2,8	22,5	49,9	21,6	3,1	17,4	0,04	0,03	0,02	4,97	0,54
82	463,0...1469	А м/з	118477	14,1	11,8	—	—	—	0,5	17,3	67,6	12,1	2,4	—	0,03	0,03	0,02	2,03	0,85
86	469,7...1476	А м/з, Гл к/п	118481	15,7	14,5	—	—	—	—	1,5	57,3	34,0	7,1	—	0,03	0,01	0,01	6,91	0,57
89	476,4...1483	П с/з, м/з	118484	25,5	1893,9	—	1,5	48,3	36,8	3,9	4,4	3,7	1,3	—	0,26	0,25	0,17	1,68	0,91
91	476,4...1483	П м/з, с/з	118488	24,7	2618,8	—	1,2	39,1	46,2	5,0	4,8	2,6	1,0	—	0,25	0,23	0,17	2,33	0,92
93	476,4...1483	П с/з	118491	24,8	2541,2	0,2	6,5	60,9	9,3	0,4	12,5	7,7	2,4	—	0,34	0,31	0,14	1,97	0,80
98	476,4...1483	П м/з, с/з	118500	23,6	3035,6	0,3	0,1	32,4	53,1	5,9	4,5	2,6	1,1	—	0,25	0,22	0,16	1,61	0,89

Примечание. Mo — частицы с максимальной встречаемостью (модальный размер), Me — частицы с 50%-й встречаемостью (медианный размер), Crg — средний геометрический размер частиц, K_s — степень сортировки (1,0...2,5 — хорошая сортировка, 2,5...4,5 — средняя сортировка, > 4,5 — плохая сортировка), K_a — степень асимметрии относительно Me ($K_a < 1$ при Mo > Me, $K_a > 1$ при Mo < Me).



и мелкозернистой алевритовой фракций содержится больше, а глинистой крупнопелитовой – меньше. Следует, однако, учитывать тот факт, что реально исследовались различные (по массе и выборке) дезинтегрированные навески одного и того же куска керна, обладающие неоднородностью за счет масштабного фактора. Поэтому абсолютного воспроизведения здесь ожидать не приходится. Несомненное преимущество лазерного анализа состоит в том, что он позволяет детально дифференцировать глинистую компоненту пород, в значительной степени контролирующую их адсорбционно-диффузионные свойства, удельное сопротивление и водонасыщенность. Согласно рис. 1, 2 и табл. 4, содержание мелкопелитовой фракции (<0,001 мм) бывает значительным — до 6,4...7,1 %.

В методическом плане был подробно исследован вопрос влияния карбонатного цемента, содержание которого в терригенных породах может изменяться от 2 до 15 %. Оптический метод позволяет очень быстро и точно исследовать исходный, неискаженный состав породы, в том числе с глинистым или карбонатным цементом. Количество карбонатного цемента при этом определяется на части исходной навески по

Таблица 5

Сравнение данных гранулометрического состава, полученных методами анализа и лазерного микроанализатора «Analysette-22» (Забродовское месторождение, скв. 236)

Но- мер об- раза	Порис- тость (K_n), %	Про- ница- емость ($K_{прг}$), фм ²	Содержание фракций, %							
			>1	1,0... 0,5	0,5... 0,25	0,25... 0,1	0,1... 0,05	0,05... 0,01	0,01... 0,001	<0,001
40	20,2	236,0	0,12	$\frac{4,6}{6,1}$	$\frac{63,3}{62,6}$	$\frac{22,6}{19,4}$	$\frac{2,0}{1,8}$	$\frac{2,7}{4,5}$	$\frac{4,7}{4,2}$	1,3
43	13,1	37,0	0,1	$\frac{2,0}{8,2}$	$\frac{71,3}{65,2}$	$\frac{11,3}{14,2}$	$\frac{4,0}{3,4}$	$\frac{3,3}{8,3}$	$\frac{8,0}{5,1}$	1,7

Примечание. В числителе данные ситового анализа, в знаменателе — лазерного микроанализатора.

объему газа, выделившегося после реакции с соляной кислотой.

Для исследований были отобраны два образца с малым и большим содержанием карбонатного цемента: обр. 67 с Чернушинского месторождения, скв. 355 и обр. 17 с Жуковского, скв. 560. В первом количество карбонатного цемента было 3 %, во втором — 14,6 %. На рис. 3 и 4 приведены дифференциальные и интегральные графики соответственно для обр. 67 и 17 (1 — исходный, 2 — после удаления карбонатного цемента). Как видим, графики отличаются незначи-

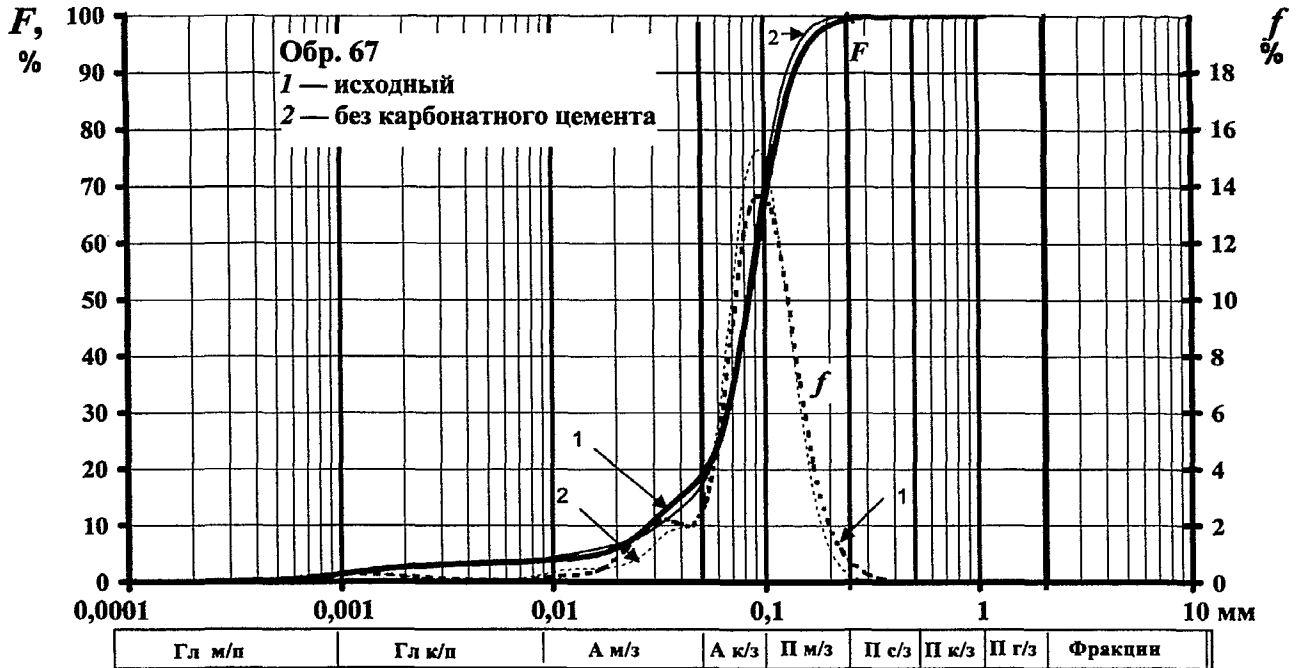


Рис. 3. Дифференциальное (f) и интегральное (F) распределения гранулометрического состава (обр. 67, скв. 355, Чернушинское месторождение)

тельно. Это подтверждают и цифровые данные табл. 6 и 8, полученные по методике тестирования стандартного образца.

Экспериментальный интервал отклонения размеров в трех точках кривой не превышает нормы, принятой для стандарта. Тем не менее имеет место малый, но все же сдвиг средних размеров зерен преимущественно в сторону занижения. В табл. 7 и 9 приведены данные о средних размерах и содержании модальной фракции частиц. Видно, что изменение средних размеров составляет 4,6...5,5 %.

Таблица 6

Данные сравнения интегральной кривой гранулометрического состава обр. 67 исходного и после удаления карбонатного цемента

Уровень	Исходный образец, мкм	Без карбонатного цемента, мкм	Доверительный интервал (Δ), мкм	Экспериментальный интервал, мкм
d10	30,29	33,52	3,0	3,2
d50	90,21	88,06	4,3	2,2
d90	150,98	139,60	16,1	11,4

Таблица 7

Результаты анализа гранулометрического состава обр. 67 исходного и после удаления карбонатного цемента

Образец	Средний арифметический, мкм	Модальный, мкм	Медианный, мкм	Содержание фракции 93 мкм, %
Исходный	93,05	93,46	90,08	59,95
Без карбонатного цемента	88,73	93,46	88,00	63,49
Абсолютное отклонение, мкм	4,32	0,0	2,08	3,54
Средняя относительная ошибка, %	4,64	0,0	2,31	—

Таблица 8

Данные сравнения интегральной кривой гранулометрического состава обр. 17 исходного и после удаления карбонатного цемента

Уровень	Исходный образец, мкм	Без карбонатного цемента, мкм	Доверительный интервал (Δ), мкм	Экспериментальный интервал, мкм
d10	9,13	7,82	3,0	1,3
d50	125,78	130,29	4,3	4,5
d90	205,23	214,05	16,1	8,8

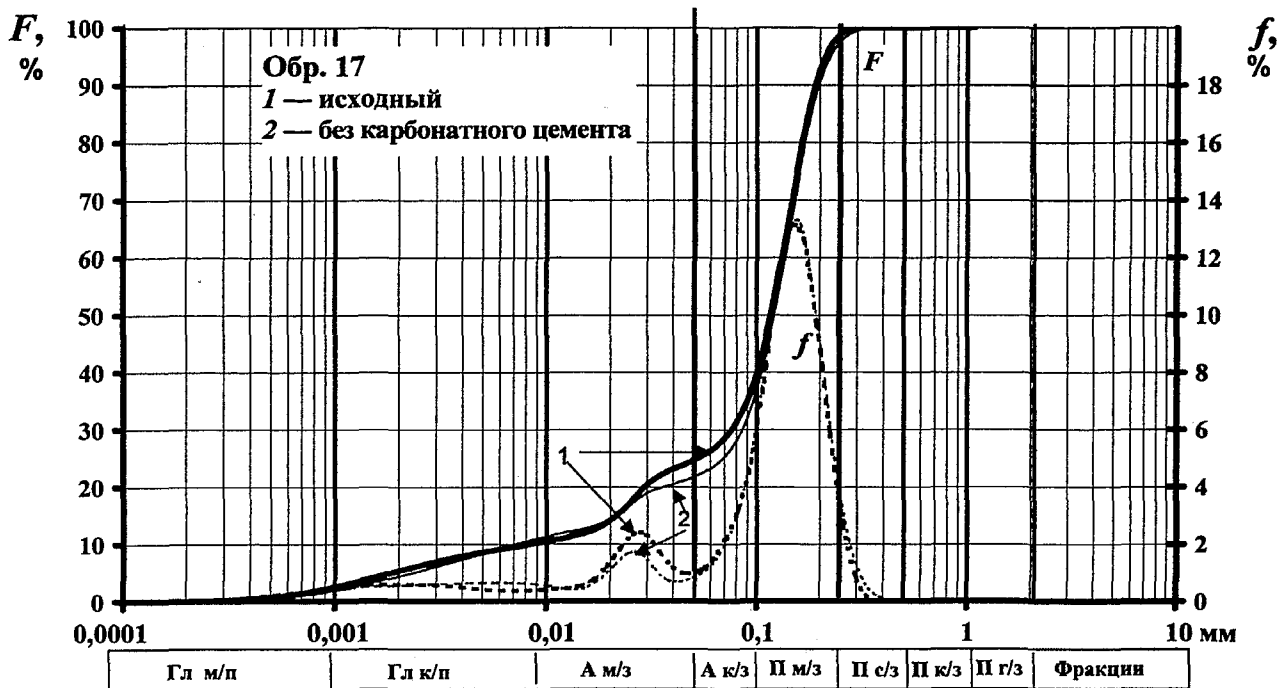


Рис. 4. Дифференциальное (f) и интегральное (F) распределения гранулометрического состава (обр. 17, скв. 560, Жуковское месторождение)

Таблица 9

Результаты анализа гранулометрического состава обр. 17 исходного и после удаления карбонатного цемента

Образец	Средний арифметический, мкм	Модальный, мкм	Медианный, мкм	Содержание фракции 148 мкм, %
Исходный	117,22	147,90	125,90	70,01
Без карбонатного цемента	123,67	153,04	130,16	69,50
Абсолютное отклонение, мкм	6,45	5,14	4,26	0,51
Средняя относительная ошибка, %	5,50	3,48	3,38	—

Эксперименты показывают, что лазерный микроанализатор обладает высокой чувствительностью: в частности, после искусственного удаления карбонатного цемента всегда отмечается изменение данных гранулометрического состава. На модальном и медианном размерах зерен это сказывается очень незначительно (до 3,5 %) и не влияет на определение типа пород. Поэтому при специальных исследованиях гранулометрического состава пород методом лазерного анализа из пробы должна быть удалена карбонатная составляющая. При решении рутинных вопросов по

идентификации типов терригенных пород с учетом преобладающей фракции гранулометрию допустимо проводить на исходных дезинтегрированных пробах.

Таким образом, использование лазерного микроанализатора «Analysette-22» существенно повышает экспрессность (в 3,0...3,5 раза) и точность (по воспроизводимости и разрешающей способности) гранулометрического анализа терригенных пород. Это свидетельствует о том, что метод может быть рекомендован в качестве обязательного и стандартного наряду с другими важными петрофизическими исследованиями, поскольку он открывает перспективы выхода в ближайшее время на палеоструктурные реконструкции бассейнов седиментации с целью оценки региональных условий формирования гранулярных коллекторов нефти и газа. Большие возможности появляются и для анализа глинистых и тонкодисперсных горных пород, являющихся естественными литологическими экранами между продуктивными пластами. Достоверная информация о глинистой составляющей пород позволит обеспечить более надежную петрофизическую базу для интерпретации данных ГИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гроссгейм В. А., Бескровная О. В., Геращенко И.Л. Методы палеогеографических реконструкций (при поисках залежей нефти и газа). — Л.: Недра, 1984. — 271 с.
2. Методы изучения осадочных пород. — М.: Гостопиздат, 1957. — 611 с.