

МЕХАНИКА

УДК 519.688

DOI 10.17223/19988621/33/4

П.С. Дозморов

**КОНТРОЛЬ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА
И ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫМИ МЕТОДАМИ**

Представлены программно-аппаратные комплексы для анализа гранулометрического состава и проницаемости горных пород, один из которых основан на комплексировании геометрического и гидродинамического методов гранулометрического анализа горных пород, что позволило учитывать коэффициент формы, в том числе и отличной от шарообразной. Другой из рассматриваемых комплексов позволяет проводить контроль проницаемости, основанный на комплексировании данных, получаемых с различных датчиков.

Ключевые слова: *комплексирование, гранулометрический состав, удельная поверхность, проницаемость пород, программно-аппаратный комплекс.*

Повышение экономической эффективности и конкурентоспособности в нефтяной и газовой промышленности невозможно без методов контроля гранулометрического состава горных пород и их проницаемости. Существует множество методов контроля характеристик исследуемого объекта. Одни и те же характеристики объекта могут контролироваться различными методами, каждый из которых выдает ошибку, заложенную в принцип реализации соответствующего метода, что уменьшает достоверность полученных данных. Существующие методики контроля не дают полного описания таких характеристик, как размер частиц, их формы, а также проницаемости горных пород, которые необходимо учитывать при разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений.

В существующих методах контроля гранулометрического состава и проницаемости горных пород применяются эмпирические зависимости и поправочные коэффициенты, что затрудняет комплексно описывать характеристики материалов. В исследованиях Литвина И.Я. [1], Браславского Д.А. [2] и других авторов (например, [3–5]) используются методы комплексирования в различных областях науки и производства с целью увеличения достоверности получаемых характеристик исследуемых объектов. Комплексирование – процесс сочетания, объединения, создания комплексов. Как показывают исследования, оптимальное комплексирование методов позволяет повысить надёжность принимаемых проектных решений для организации контроля. Однако данные методы не используются для контроля процессов седиментации и определения проницаемости горных пород.

Целью данного исследования является разработка контроля программно-аппаратными способами гранулометрического состава осадочных горных пород и их проницаемости. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1) исследовать влияние комплексирования на контроль процессов осаждения частиц и определения проницаемости горных пород;

2) разработать программно-аппаратный измерительный комплекс для анализа гранулометрического состава горных пород на основе комплексирования методов микроскопии и седиментации для увеличения точности гранулометрического анализа и программно-аппаратный измерительный комплекс для анализа проницаемости горных пород, особенностью которого является контроль за расходом жидкости в расширенном диапазоне (0,0001–30 мл/мин) и поддержанием разности давления в созданном комплексе;

3) разработать практические рекомендации по использованию программно-аппаратных комплексов для контроля гранулометрического состава и проницаемости горных пород.

Основная часть

Теоретический анализ методов определения гранулометрического состава частиц и проницаемости горных пород выявил ряд преимуществ и недостатков. Каждый метод с позиции контроля имеет свое преимущество [6]. Очевидными преимуществами рассмотренных методов являются: достоверность визуализации (метод микроскопии); широкий диапазон измеряемых размеров частиц (ситовой и дифракционный методы); быстрота расчета (дифракционный метод); простота методов (метод седиментации). К существенным недостаткам этих методов следует отнести предположение о сферичности частиц, что влияет на точность определения их размеров, а также на физико-химические свойства исследуемых образцов и недостаточную точность измерений проницаемости для низкопроницаемых пород.

Принцип седиментационного метода анализа дисперсности лег в основу различных измерительных приборов, отличающихся методами реализации. Для данного исследования выбрана модель седиментации из стартового слоя, которая обеспечивает осаждение с одной высоты всех частиц анализируемой пробы порошка. В результате фиксируются все, даже самые крупные частицы, которые при обычных методах седиментационного анализа успевают достигнуть дна кюветы до начала измерений. Данная модель реализована в измерительном приборе «Весовой седиментометр ВС-4» [7]. Однако его использование имеет ряд ограничений:

- Связь проходит в жесткой привязке к персональному компьютеру с операционной системой (ОС) Windows. Данная операционная система не обеспечивает точной привязки к реальному времени. Например, пользователю необходимо получать информацию с частотой один раз в секунду. ОС выполняет ряд своих функций и задачу пользователя. Если ОС занята выполнением другой задачи, то происходит передержка сигнала, что ведет к искажению времени (вместо 1 с – может пройти 1,5 с).

- Данная сборка лишена возможности контролировать среду осаждения, например температуру жидкости, в которой происходит анализ, что вносит большие ограничения в эксплуатационные характеристики прибора.

- Калибровка прибора осуществляется пользователем прибора, которому необходимо знать физический принцип его построения, что требует дополнительного времени для обучения.

- Аппаратная часть прибора разрабатывалась около 20 лет назад. В настоящее время точность микросхем, а также интерпретация сигналов улучшена.

В исследовании процессов, происходящих при добыче нефти, кроме важнейшего параметра – размера частиц горной породы, необходимо учитывать способность горной породы пропускать к забоям скважин нефть или газ при перепадах давления. Такая способность характеризуется проводимостью коллектора (горная порода, содержащая пустоты (поры, каверны или системы трещин) и способная вмещать и фильтровать флюиды (нефть, газ, воду)) и называется проницаемостью горной породы.

В существующих нефтяных пластах при сравнительно небольших перепадах давлений) многие породы, из-за малых размеров пор, оказываются практически малопроницаемыми или совсем непроницаемыми для жидкостей и газов (глины, сланцы и др.). Для таких пород существует недостаточное количество прямых методов контроля.

Пути решения выявленных проблем

Проведенный анализ работ показал, что перспективным методом является метод, основанный на комплексировании измерительных устройств, комплексировании имеющейся информации с целью минимизирования ошибки оценивания полученного результата. Наибольшее количество исследований с использованием необходимости комплексирования связаны с методами изучения земных недр и видов геофизических комплексов, что связано с разнообразием разведываемых объектов, многообразием их свойств и связей, и геологическая эффективность при их изучении тем выше, чем более широким будет комплекс. Возрастание количества комплекслируемых методов является условием достоверности контроля. На основании проведенного анализа научно-методических исследований и методик комплексирования в различных областях применения предлагается его классификация по методикам использования (рис. 1).

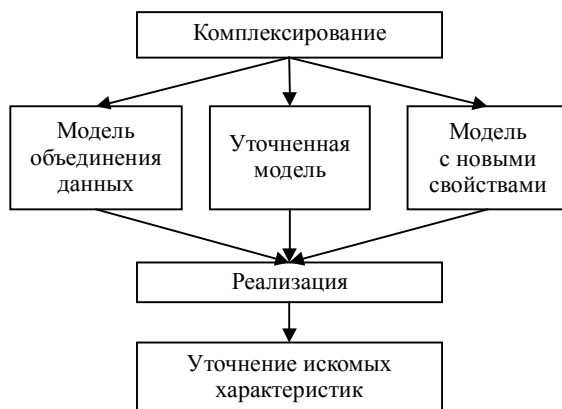


Рис. 1. Классификация комплексирования по методикам использования

Данная классификация позволяет выбирать ту или иную модель комплексирования в зависимости от целей решаемой задачи.

Характеристика моделей, представленных на рис. 1.

Кластер «Уточнённая модель» (рис. 2) подставляет собой внедрение характеристик одной модели в другую, тем самым увеличивая точность исходной модели.

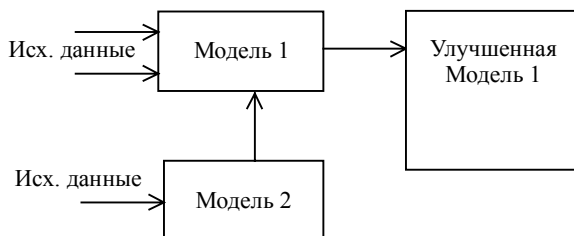


Рис. 2. Улучшенная модель

В кластере «Модель с новыми свойствами» (рис. 3) в результате комплексирования получаемая модель обладает хотя бы одним свойством, отличным от свойств в исходных моделях.



Рис. 3. Модель с новыми свойствами

Кластер «Реализация» (рис. 4) получается в результате комплексирования с её программной или программно-аппаратной реализацией при выполнении условия, что программная не влияет на свойства модели, но может уточнять качество модели.

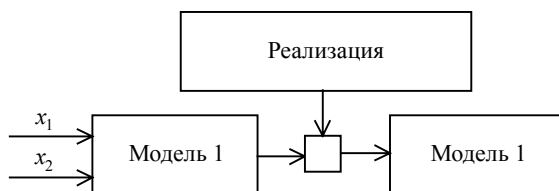


Рис. 4. Комплексирование модели с программной реализацией

Предложенная классификация позволяет, в зависимости от решаемой задачи повышения точности, выбрать объекты комплексирования.

На основании представленного в литературе физико-математического описания процессов седиментации предлагается использование одного из кластеров комплексирования «Модель с новыми свойствами». С этой целью используется уравнение Розина – Раммлера – Беннета [8] путем преобразования получаемой информации в аппаратной части с целью создания алгоритма для машинной обработки данных о гранулометрическом составе с учетом формы частиц, в том числе отличной от шарообразной. В работе [9] представлен алгоритм нахождения коэф-

фициентов для уравнения Розина – Раммлера – Беннета, зная которые, можно найти следующие величины:

- медиану полученного распределения;
- удельную поверхность частиц с учетом их форм;
- дифференциальное распределение частиц по размерам;
- интегральную функцию распределения частиц по размерам;
- массовую долю частиц по фракциям в процентном соотношении;
- количество частиц в процентном соотношении;
- коэффициент формы для каждого диапазона измерений.

Представленный метод анализа гранулометрического состава, с позиции преобразования получаемой информации с аппаратной части прибора, является наиболее применимым в качестве метода для алгоритмизации процедуры и аппаратной обработки данных для данного прибора, а также при использовании данных, полученных методом микроскопии. Появляется возможность измерять коэффициент формы частиц (что невозможно было определить отдельными методами) и увеличить точность расчета удельной поверхности частиц. Это позволяет более подробно рассматривать фильтрационные свойства горной породы.

Разработанный программно-аппаратный комплекс для анализа гранулометрического состава горных пород позволяет определять коэффициент формы частиц и учитывать её при анализе. С этой целью была улучшена аппаратная часть прибора «Весовой седиментометр ВС-4».

В разработанной аппаратной части использован датчик температуры для контроля среды осаждения, в которой происходит анализ, что позволяет исключить большие ограничения в эксплуатационные характеристики прибора. Калибровка разработанного программно-аппаратного комплекса осуществляется автоматически, что позволяет случайную погрешность при проведении измерений заменить на статическую погрешность прибора, которую программная часть комплекса учитывает. За процесс сбора и обработку информации отвечает микроконтроллер с операционной системой с жесткой привязкой времени, что позволяет осуществлять достоверный контроль времени.

Общая схема комплекса представлена на рис. 5.

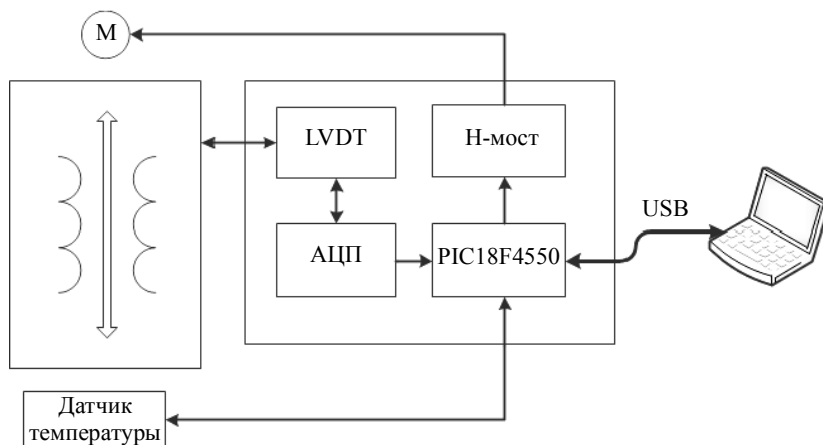


Рис. 5. Блок-схема аппаратной части комплекса для анализа гранулометрического состава

Для разработанной аппаратной части создан программный комплекс, который позволяет:

- вести запись полученных результатов;
- производить калибровку в автоматизированном режиме (при необходимости калибровки программа спрашивает у пользователя производить ли её);
- производить расчет гранулометрического состава по трем методам:
 - методу Розина – Рамлера – Беннета (для его использования достаточно данных, полученных с прибора);
 - комплексирования данных с использованием метода Розина – Рамлера – Беннета (для его использования необходимы данные как с седиметметра, так и с микроскопа);
 - вариационного ряда (для его использования необходимы данные с микроскопа) [10].

Полученный комплекс позволяет учесть коэффициент формы частиц горных пород и учитывать его при анализе гранулометрического состава, а также определять более достоверные характеристики исследуемого образца горной породы.

На основании характеристик кластеров объектов комплексирования с выделением их свойств, описанных выше, создан комплекс программной и аппаратной части прибора, которая позволяет определять проницаемость у низкопроницаемых горных пород (рис. 6).

Данный комплекс состоит из пяти датчиков давления, блока управления плунжерами, а также двух плунжеров, каждый из которых имеет шаговый двигатель и два концевика.

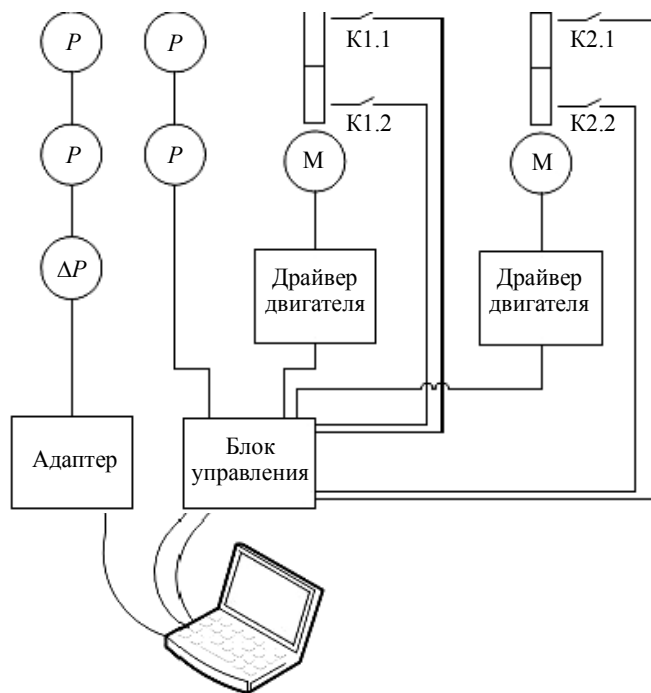


Рис. 6. Блок-схема электрической части комплекса для анализа проницаемости

Для работы с данным комплексом разработано программное обеспечение, позволяющее:

- задавать скорость прокачки жидкости;
- получать данные каждую секунду со всех датчиков давления;
- отображать графически положение плунжера в реальном времени;
- отображать полученные данные в виде графиков;
- задавать режим поддержания давления в системе с учетом критического давления;
- вести запись всех полученных результатов, а также обрабатывать их в ходе анализа.

В процессе использования полученного программно-аппаратного комплекса были отмечены его преимущества:

- расширение диапазона скорости подачи жидкости от 0,0001 до 30 мл/мин;
- возможность автоматического поддержания перепада давления или избыточного давления в гидравлической системе при использовании пяти датчиков давления в составе одноплунжерного насоса и системы фильтрации установки;
- реализация единой системы сбора и подготовки данных к анализу, что позволяет вести запись полученных результатов в реальном времени.

Таким образом, реализация методов комплексирования позволяет осуществлять более достоверный контроль горных пород путем учета несферичности частиц при анализе гранулометрического состава, а также увеличивать диапазон измерений проницаемости при анализе горных пород.

Сравнение экспериментальных данных

Сравнение экспериментальных данных определения гранулометрического состава горных пород, полученных с прибора «Весовой седиментометр ВС-4», и данных, полученных с разработанного программно-аппаратного комплекса, с позиции несферичности показало, что, как видно из таблицы, форма частиц в «Весовом седиментометре ВС-4» одинакова во всех диапазонах измеренных частиц, в то время как в разработанном комплексе форма частиц при изменении диапазона меняется (близка к сфере).

Сравнение критерия формы в приборах

Диапазон размера частиц, мкм	Коэффициент формы	
	«Весовой седиментометр ВС-4»	Разработанный комплекс
3/0	0	0,0638
5/3	0	0,0869
7/5	0	0,0302
10/7	0	0,0803
14/10	0	0,027
18/14	0	0,0361
20/18	0	0,0345
22/20	0	0,014
24/22	0	0,0217
26/24	0	0,0244
28/26	0	0,0246

Данный параметр (коэффициент формы) значительно влияет на удельную поверхность частиц, которая является важным параметром для расчета остаточных нефтяных запасов при прогнозировании добычи нефти.

Диапазон исследованных размеров частиц – 1–60 мкм, а воспроизводимость и достоверность результатов находится в пределах 5 % погрешности (по t-критерию Стьюдента), при этом точность созданного комплекса возросла на 2 % относительно получаемого гранулометрического распределения размеров частиц.

Результаты расчета показывают, что с уменьшением задаваемого расхода жидкости для измерения проницаемости погрешность разработанного комплекса уменьшается (рис. 7).

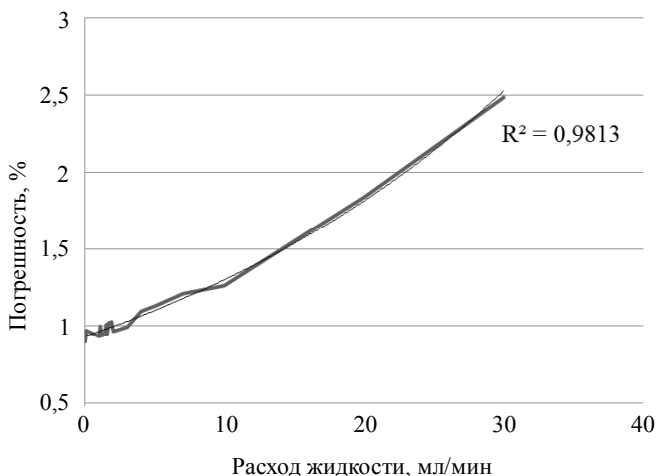


Рис. 7. Зависимость погрешности измерений от задаваемого расхода жидкости

В настоящее время для измерения проницаемости горных пород используются приборы с диапазоном расхода жидкости от 0,001 до 30 мл/мин. Разработанный комплекс позволяет задавать расход жидкости от 0,0001 мл/мин и проводить анализ низкопроницаемых горных пород (нижняя граница измерений в 10 раз меньше, чем в существующих приборах, используемых в нефтяной промышленности).

Выводы

В исследовании получены следующие основные результаты:

- впервые исследовано влияние комплексирования на контроль осаждения частиц, что позволило создать методику комплексирования гидродинамического и геометрического методов контроля размера частиц;
- разработан и внедрен метод комплексирования способов анализа гранулометрического состава (методы седиментации и микроскопии), что позволило учитывать форму частиц, отличную от шарообразной, с целью повышения точности измерений (на 2 %). На основе полученного метода разработан программно-аппаратный измерительный комплекс для анализа гранулометрического состава горных пород. Полученный комплекс позволяет анализировать размер частиц с учетом их формы в диапазоне от 1 до 60 мкм экспресс-методом. Воспроизводимость и достоверность результатов лежит в пределах 5 %-й погрешности (по t-критерию Стьюдента);

- разработан и внедрен программно-аппаратный измерительный комплекс для контроля определения проницаемости горных пород, что позволило задавать расход жидкости в 10 раз более точно с погрешностью не более 1%;

- разработаны и внедрены практические рекомендации по использованию созданных программно-аппаратных комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвин И.Я. Комплексирование газогеохимических и геотермических методов при поисках месторождений нефти и газа: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1994. 166 с.
2. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.
3. Абабков К.В., Сулейманов Д.Д., Султанов Ш.Х., Котенев Ю.А., Варламов Д.И. Основы трехмерного цифрового геологического моделирования: учеб. пособие. Уфа: Нефтегазовое дело, 2010. 199 с.
4. Баранцев Р.Г. Комплексирование целостности // Глобализация: синергетический подход. М.: РАГС, 2002. С. 83–89.
5. Белая книга по нанотехнологиям: исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокomпозитов в Российской Федерации: по материалам Первого Всероссийского совещания ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий / Комиссия РАН по нанотехнологиям [и др.]; [сост.: В.И. Аржанцев и др.]. М.: Издательство ЛКИ, 2008]. 327 с.
6. Квеско Н.Г., Росляк А.Т., Дергунов А.С. Анализ гранулометрического состава горных пород и буровых растворов на основе слоевой седиментации. Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики // Материалы VI Всероссийской научной конференции. Томск, 2008. С. 379–380
7. Патент РФ № 2000563. / Седиментометр. Квеско Н.Г., Колесников А.А. Оpubл. Б.И. № 33–36, 1993. 4 с.
8. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1974. 279 с.
9. Дозморов П.С., Росляк А.Т. Методика преобразования накопительной функции седиментометра в гранулометрический состав горной породы // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 06. С. 267–274.
10. Регистрация программы № 2012660447. Программное обеспечение для определения размера дисперсных частиц с применением прямого микроскопа проходящего света.

Статья поступила 16.12.2014 г.

Dozmorov P.S. CONTROL FOR THE GRANULOMETRIC COMPOSITION AND PERMEABILITY OF ROCKS BY SOFTWARE AND HARDWARE METHODS. DOI 10.17223/19988621/33/4

There are many methods of control for characteristics of an object in oil and gas industry. Similar characteristics of the object can be controlled by a variety of methods each of which produces an error inherent in the implementation of the principle of an appropriate method, which reduces the reliability of the data. Existing control methods do not provide a complete description of characteristics (such as particle size, shape, and permeability of rocks) that need to be considered in the development and operation of oil and gas fields. In this paper, it is proposed to increase the reliability of the characteristics using the method of combination.

Based on the analysis of scientific and methodological researches and combination techniques in different application areas, a classification of combination methods in the aspect of operation techniques is proposed and a cluster characteristic of combination objects with a description of their properties is presented. This classification permits one to choose one or another combination model depending on purposes of the solved problem.

This paper presents the hardware and software systems for the analysis of particle size distribution and permeability of rocks. These complexes permit one to control for the particle size with

allowance for the shape factor and determine the permeability in low-permeability rocks by enhancing the range specified by the liquid flow (0.0001–30 ml/min).

The designed device for monitoring the particle size distribution is based on a combination of geometric and hydrodynamic methods, which makes it possible to measure the coefficient of the particle shape, including other than spherical. As a result, the device allows measuring the particle size in the range of 1–60 microns, repeatability, and reliability of results within the error of 5% (by Student's t-test), the accuracy of the created complex increased by 2% with respect to the particle size distribution regardless of the shape.

The proposed device allows one to find the median of the obtained distribution and specific surface area of particles in accordance with their shapes, differential particle size distribution, cumulative particle size distribution function, weight percentage of particle fractions, particle number percentage, and formfactor for each measurement range.

The author of the article also proposes a device allowing one to determine the permeability in low-permeability rocks based on a combination of data from different sensors (pressure, differential pressure, and temperature) in a single system for collecting and analyzing information. This allows one to automatically maintain the pressure (for any sensors, depending on the method) in the experiments.

Keywords: combination, particle size distribution, specific surface area, permeability rocks, software and hardware system.

DOZMOROV Pavel Sergeevich (Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia)

E-mail: dozmorov88@gmail.com

REFERENCES

1. Litvin I.Ya. *Kompleksirovanie gazogeokhimicheskikh i geotermicheskikh metodov pri poiskakh mestorozhdeniy nefti i gaza*. Diss. kand. geol.-min. nauk. M., 1994, 166 p. (in Russian)
2. Braslavskiy D.A., Petrov V.V. *Tochnost' izmeritel'nykh ustroystv*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 312 p. (in Russian)
3. Ababkov K.V., Suleymanov D.D., Sultanov Sh.Kh., Kotenev Yu.A., Varlamov D.I. *Osnovy trekhmernogo tsifrovogo geologicheskogo modelirovaniya*. Ufa, Neftegazovoe delo Publ., 2010, 199 p. (in Russian)
4. Barantsev R.G. Kompleksirovanie tselostnosti. *Globalizatsiya: sinergeticheskiy podkhod*. Moscow, RAGS Publ., 2002, pp. 83–89. (in Russian)
5. *Belaya kniga po nanotekhnologiyam: issledovaniya v oblasti nanochastits, nanostruktur i nanokompozitov v Rossiyskoy Federatsii: po materialam Pervogo Vserossiyskogo soveshchaniya uchenykh, inzhenerov i proizvoditeley v oblasti nanotekhnologiy*. Moscow, LKI Publ., 2008, 327 p. (in Russian)
6. Kvesko N.G., Roslyak A.T., Dergunov A.S. Analiz granulometricheskogo sostava gornykh porod i burovnykh rastvorov na osnove sloevoy sedimentatsii. *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki. Materialy VI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii*. Tomsk, 2008, pp. 379–380. (in Russian)
7. Kvesko N.G., Kolesnikov A.A. *Sedimentometr*. Patent RF, no. 2000563, 1993. (in Russian)
8. Kouzov P.A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov*. Leningrad, Khimiya Publ., 1974, 279 p. (in Russian)
9. Dozmorov P.S., Roslyak A.T. Metodika preobrazovaniya nakopitel'noy funktsii sedimentometra v granulometricheskii sostav gornoy porody. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie*, 2013, no. 06, pp. 267–274. (in Russian)
10. Registratsiya programmy no. 2012660447. *Programmnoe obespechenie dlya opredeleniya razmera dispersnykh chastits s primeneniem pryamogo mikroskopa prokhodyashchego sveta*. (in Russian)