УДК 665.6/.7

ПРИБОРНО-МЕХАТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ОТБОРА ПРОБЫ ИЗ ПОТОКА НЕФТИ

Кашаев Р.С., Козелков О.В.

ФГОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», Казань, e-mail: kashaev2007@yandex.ru

Для отработки технологии представительного отбора пробы из потока, а также для использования в учебном процессе предлагается приборно-мехатронный комплекс с управлением от контроллера Atmega 8515L. Используется устройство, обеспечивающее интенсивную турбулизацию потока и тем самым повышенную представительность пробоотбора, позволяющее в едином измерительном комплексе реализовывать анализ большинства параметров скважинной жидкости. Сделан вывод о преимуществах метода ядерной магнитной резонансной (ЯМР) релаксации по сравнению с другими для удовлетворения требований ГОСТ 8.615-2005, поскольку метод и аппаратура проточного анализа методом ЯМР позволяет в едином приборе осуществлять экспресс-анализ скважинной жидкости. Описана аппаратура и методика реализации экспресс-метода ЯМР для определения расхода, концентрации воды, плотности нефти и газового фактора в скважинной жидкости.

Ключевые слова: поток, представительность, пробоотбор, ядерный, магнитный, резонанс, анализ

INSTRUMENTAL-MECHATRONIC COMPLEX OF ON-LINE OIL SAMPLING

Kashaev R.S., Kozelkov O.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: kashaev2007@yandex.ru

For working out of technology of representative on-line sample selection, as well as for use in education process proposed an instrumental-mechatronic complex driving by controller Atmega8515L. For this purpose used device, ensuring intensive turbulization of the flow and so increased representation of probe selection, which gives an opportunity in single measurement complex realize analysis of majority parameters of oil-well liquid. Conclusion is made concerning advantages of method of nuclear magnetic resonance (NMR) relaxation over others for satisfaction requirements of GOST 8.615-2005, because method and apparatus of on-line analysis by NMR-method gives opportunity in one device to realize express-analysis of oil-well liquid. Described an apparatus and methods for realization of NMR express-method for determination of oil-well productivity, concentrations of water, density and gas factor in oil-well liquid.

Keywords: flow, representation, sampling, nuclear, magnetic, resonance, analysis

Нефтедобывающая промышленность и энергетика нуждаются в автоматических приборах для контроля параметров многофазных жидкостей на потоке, не разделяя их на фазы и не используя движущихся деталей [8]. Особенно это ощущается в нефтедобывающей промышленности. ГОСТ 8.615-2005 требует оперативного контроля расхода, концентрации воды, газа и плотности скважинной жидкости (СКЖ) в проточном режиме (на скважинах, в трубопроводах), погрешность измерений которых может достигать 15 %. Это связано с низкой представительностью пробоотбора образцов СКЖ, который усложняется твердыми примесями (глина, твердые частицы, ржавчина). Представительный пробоотбор необходим для многофазных измерителей (МФИ), которые используются на нефтяных месторождениях как на суше, так и на морских промыслах. Использование МФИ снижает капитальные вложения и затраты на эксплуатацию нефтедобывающего оборудования [9]. Измерения дебитов скважин многофазными расходомерами (МФР) особенно актуальны. Из зарубежных МФР следует отметить «мультирасходомер» MPFM-50 на расходомере Кориолиса в сочетании с влагомером [10]. Из отечественных разработок можно отметить разработку Г.А. Калабина [4], основанную на ядерном магнитном резонансе (ЯМР) высокого разрешения. Погрешности измерений расхода ± 0,25 % (по точности вторичной аппаратуры), концентрации воды, плотности ± 1 %, газового фактора ≤ 4 %.

Структуры потоков скважинной жидкости и представительность пробоотбора

Структуры потока двухфазных жидкостей весьма многообразны (рис. 1).

Представительность образцов наивысшая при максимальной однородности распределения компонентов потока по поперечному сечению трубопровода. Для этого необходимо тщательное перемешивание и предотвращение гравитационного разделения. Это достигается при отборе пробы из вертикального потока. Должно выполняться условие изокинетичности отбора пробы согласно ГОСТ 2517 с высокой частотой, чтобы регистрировать изменение

содержания воды. Испытания [3] щелевых пробоотборных устройств (ЩПУ), установленных на вертикальном участке с учетом изменений № 1 к ГОСТ 2517, показали, что представительность отбора зависит от концентрации воды. Эти трудности можно исключить использованием отбора пробы всего потока. Наилучшие результаты получают, используя полнопоточный первичный преобразователь объемной доли воды в нефти (ПИП-ВСН) с разделением диапазона воды на четыре поддиапазона: 0–3 %; 2–40 %; 40–70 % и 70–100 %. Первый поддиапазон относится к товарной «сухой» нефти. Кроме того, по рекомендациям [13] для представительности частичного пробоотбора необходимо выполнить требования: создать максимальную однородность компонентов в трубопроводе, либо иметь возможность отбирать на разных уровнях сечения трубы; лабораторный анализ – последняя инстанция, определяющая правильность всего пробоотбора. Но полной представительности пробоотбора сырой нефти (СН) достичь практически невозможно (Демьянов) [3] (кроме анализа методом ЯМР).

На представительность пробоотбора оказывает влияние положение трубы. При горизонтальном положении возможна ситуация, когда под действием гравитации произойдет расслоение потоков (особенно при низких скоростях) и труба будет заполнена не полностью. В этом случае 3 расход $Q = vS$ в такой трубе составляет

$$Q = (A^3 g/T)^{0,5} = \{g[0,5\pi R^2 - (R - H)(R^2 - (R - H)^2)^{0,5} - R^2 \arcsin((R - H_2)/H)]^3/2(DH - H^2)^{0,5}\}^{0,5}, \quad (1)$$

где A – зона жидкого потока в трубе, g – ускорение свободного падения, T – хорда линии (поверхности) жидкости в сечении трубы, R и D – радиус и диаметр трубы, H и H_2 – высота уровня жидкости, когда она меньше и больше радиуса R.

Анализ структуры газожидкостного потока (ГЖП) можно осуществлять с помощью установки УВТ [1, 2], при пузырьковой структуре потока, которая наблюдается при расходе > 7 м^3/час (1,94 л/с) и объемном содержании газа V в жидкости < 15 %.

Отбор представительной пробы в диапазоне влажности W = 40–70 % – трудная техническая задача, которую можно решить путем размещения всей трубы в зазоре магнита при использовании метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР). На ∅5 см трубы успешно эксплуатируется магнит с достаточной однородностью на частоту резонанса протонов в 2 МГц фирмы *Maran* (*UK*) и для такого диаметра трубы ЯМР-анализатор может быть реализован как полнопоточный. Возможно применение также магнита для томографа.

Рис. 1. Режимы течения потока нефть – вода в горизонтальной трубе

Проточные многофазные измерители на базе анализаторов ЯМР

МФИ на методе ЯМР является, пожалуй, единственным экспресс-анализатором, способным одновременно контролировать расход, концентрацию воды, нефти и газа во всем диапазоне, а также такие важные характеристики СКЖ и водо-органических смесей, как дисперсность (распределение размеров капель воды), общую серу, вязкость и плотность [4–8]. Использовать метод импульсного ЯМР для измерения скорости течения жидкости в магнитном поле впервые предложил Хан [12]. Разработка ЯМР-расходомеров за рубежом начата фирмой Bodger Meter Manufacturing Co, г. Милуоки, штат Висконсин, США. Фирма Bruker (ФРГ) с 1988 г. начала использовать лабораторный релаксометр ЯМР Minispec для измерения расхода жидкости при проведении стереохимических исследований жидкостей, контроля смешения потоков разных нефтей и процесса крекинга нефти [11].

Одним из авторов статьи на конкурс ВНТО приборостроителей имени С.И. Вавилова в 1988 г. по результатам НИР «Разработка и исследование метода определения воды в сырой нефти» тема 7620 428610 Фа 15-3401 в НПО «Нефтепромавтоматика» был предложен проект «ЯМР-анализатор многофазных потоков продукции скважин без сепарации». В 1995 г. в Казанский НИРТИ были переданы электрические принципиальные схемы передатчика, приемника и датчика ЯМР, методика измерения, программное обеспечение и конструкция системы пробоотбора (первого поколения), на что имеются соответствующие акты передачи. Были проведены метрологические испытания ЯМР-анализатора, показавшие его соответствие техническим условиям. Первое сообщение о разработанном поточном ЯМР-анализаторе было сделано на XXVIII Ampere Congress, 1996, Canterbury, England [14]. Использованная тогда байпасная система пробоотбора представлена на рис. 2.

Как видно из рис. 1, отбор пробы осуществлялся двумя встречно расположенными в верхней и нижней части горизонтальной трубы параболическими пробоотборниками для отбора фракции СКЖ с повышенным содержанием газа и воды соответственно.

В 2008 г. нами был разработан ЯМР-анализатор второго поколения [8]. Его функциональная схема для анализа СКЖ приведена на рис. 3. Расстояние, на которое можно переместить патрубок в расширении трубопровода, соответствует 130 мм.

Конструкция системы представлена на рис. 3.

Принцип пробоотбора использует уравнение Бернулли, по которому изменения давление жидкости P_i в разных сечениях трубы S_i при скоростях V_i описывается уравнением

$$P_i/\rho g + V_i^2/2g = \text{cons}. \qquad (2)$$

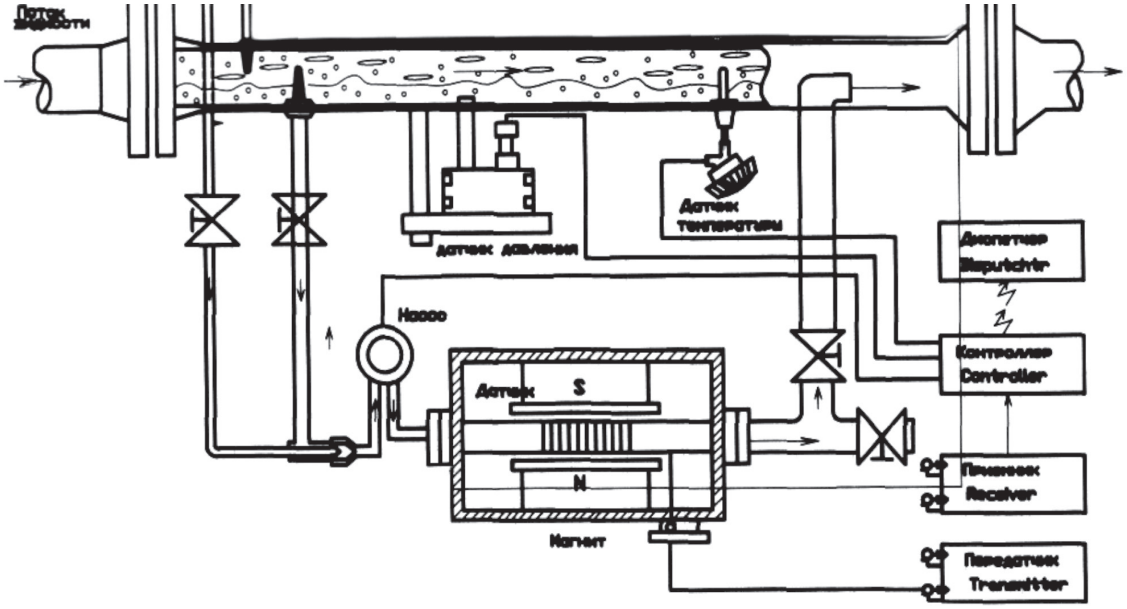

Рис. 2. Функциональная схема проточного ЯМР-анализатора

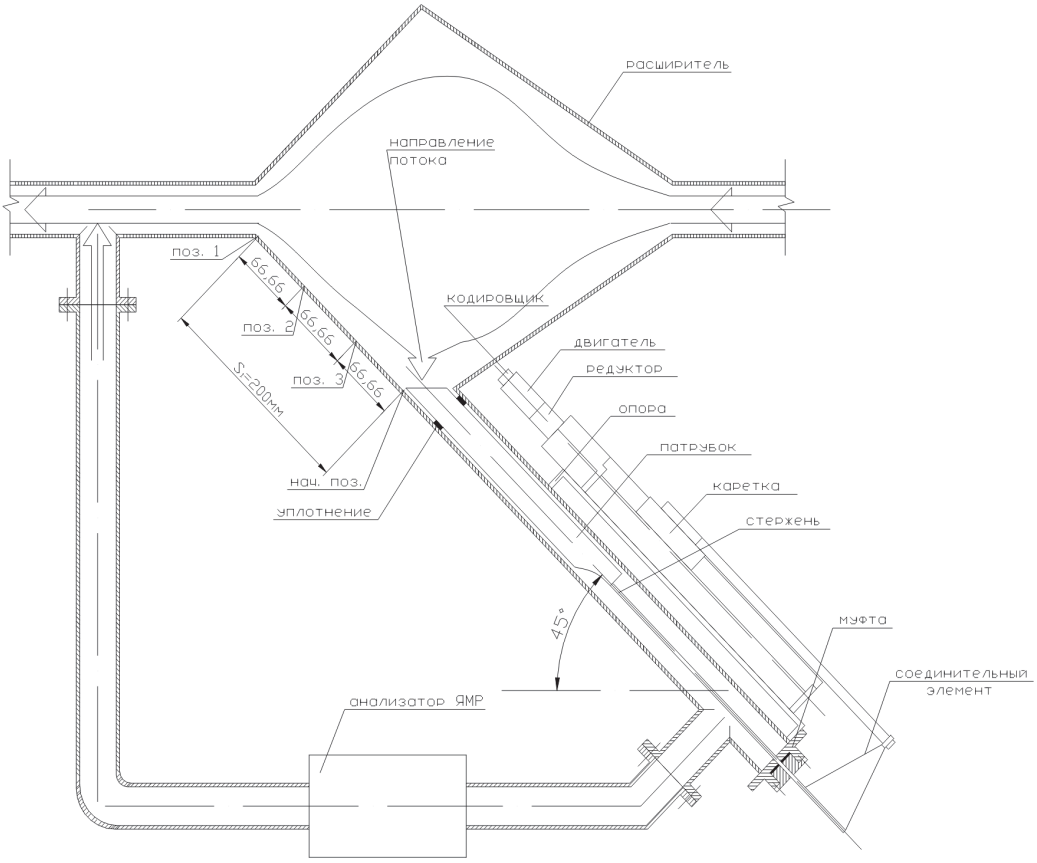

Рис. 3. Система проточного пробоотбора для датчика релаксометра ЯМР

В сечении S_i расход равен $Q_i = S_i V_i$. Поток жидкости, попадая в расширение трубы (рис. 3), снижает скорость V и увеличивает давление P в степени, пропорциональной $\sqrt{S}$. В результате происходит интенсивная турбулизация смеси, которая через входной патрубок поступает со скоростью V_i, определяемой положением патрубка в датчик в магните ЯМР-анализатора. Скорость потока будет определяться разницей давлений ($P_{max} - P_i$). При расположении патрубка в сечении на уровне магистральной трубы ($P_{max} - P_i$) = 0 и скорость движения потока через датчик ЯМР будет $V_i = 0$, что необходимо для измерения ЯМР-параметров в неподвижной среде. Тем самым отпадает необходимость реальной остановки потока, что позволяет отказаться от взрывозащищенных вентилей и задвижек, имеющих ограниченный ресурс работы. Узел перемещения патрубка представлен на рис. 4. Программа в *ATMEGA* 8515*L* выполняет следующие операции: Инициализацию микроконтроллера – портов *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, таймера/счетчика 1, универсального синхронно/асинхронного приемопередатчика (*USART*), дисплея *VFD*, внешнего прерывания *INT0*; выдает сообщение «ТЕК. ПОЛОЖ.» на экране *VFD*; перехода в подпрограмму сравнения принятого кода запуска. После этого на компьютере вызывается основная программа управления.

В 2015 г. авторами запатентован [6] ЯМР-анализатор третьего поколения (рис. 5). Устройство пробоотбора в приборно-мехатронном комплексе работает следующим образом. Предварительно в остановленном потоке, когда патрубок 7 находится на уровне сечения измерительной трубы 1, т.е. при перепаде давления ($P_T - P_i$) = 0, производится замер концентрации воды W в СКЖ, по которой выбирается соответствующая данной W зависимость скорости спин-спиновой релаксации $(T_2)^{-1}$ от скорости потока V_i и оптимальное положение патрубка. При измерении расхода по команде с контроллера патрубок 7 перемещается в положение, соответствующее максимальной крутизне зависимости $(T_2)^{-1}$ от скорости потока V_i. Далее поток через фланцы 10 поступает в магнит 11 релаксометра ЯМР. Сигнал ЯМР передается на разъем 16 и по кабелю 22 длиной в четверть резонансной волны ($\lambda/4 = \nu_o c$, где с – скорость света) поступает в приемник и по радиоканалу – к диспетчеру.

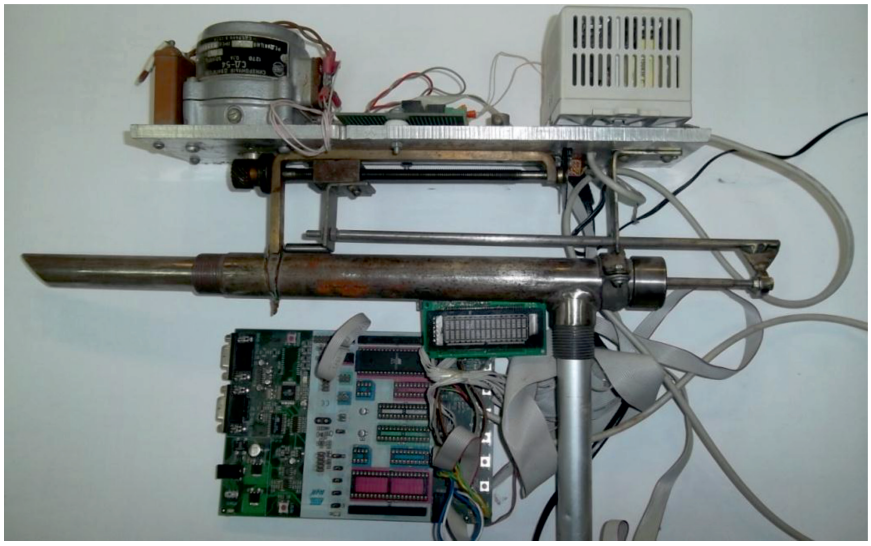

Рис. 4. Мехатронный узел – автоматическое, управляемое от микропроцессорного контроллера устройство отбора проб СКЖ из трубопровода

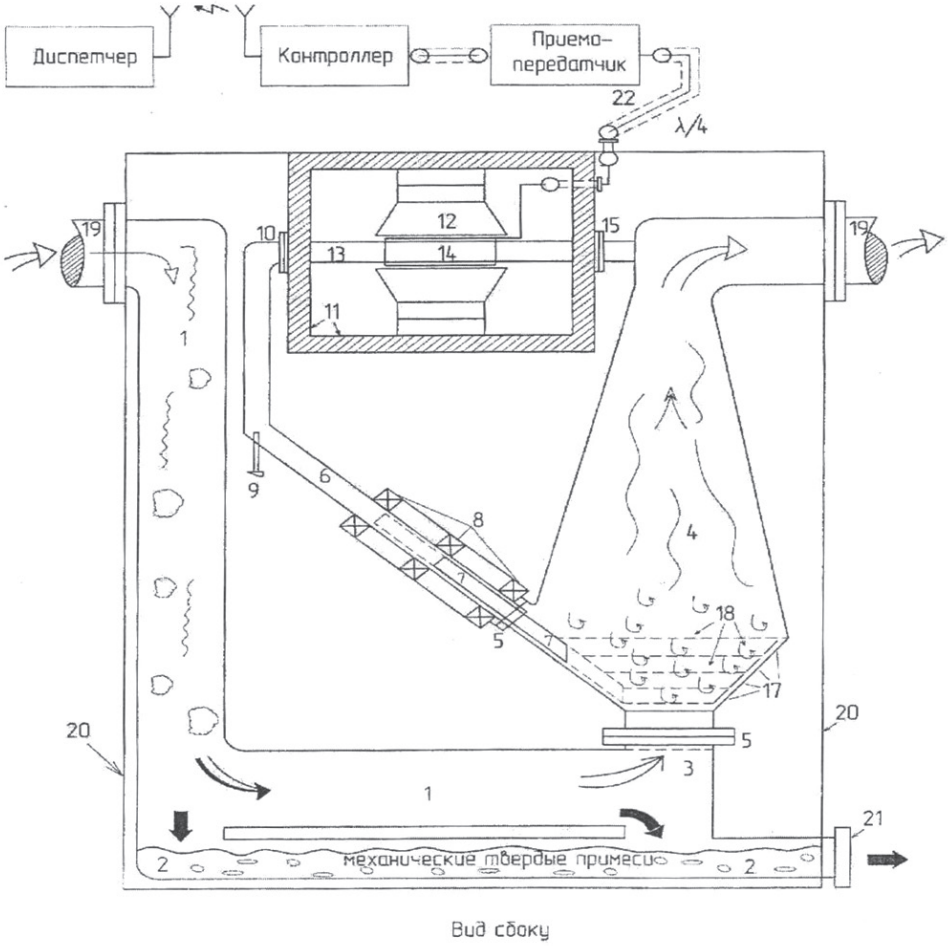

Рис. 5. Конструкция системы пробоотбора и анализа параметров проточной жидкости методом ЯМР-релаксометрии по патенту [6]

Для определения параметров используются экспериментально полученные авторами зависимости [8] между ЯМР-параметрами T_1, T_2, $P_{1,2i}$ и параметрами СКЖ.

Заключение

Анализ систем измерения и пробоотбора для проточного экспресс-анализа по требованиям ГОСТ 8.615-2005 указывает на преимущества метода ядерной магнитной резонансной (ЯМР) релаксации по сравнению с другими, поскольку метод и аппаратура проточного анализа методом ЯМР позволяет в едином приборе осуществлять экспресс-анализ скважинной жидкости.

Список литературы

1. Березовский Е.В., Немиров М.С., Лукманов П.И., Газизов Р.Р. Установка для испытаний средств измерений на эталонных газожидкостных смесях с цифровой обработкой данных // М.: Приборы, 2009. – № 1. – С. 3–10.

2. Березовский Е.В., Акчурин А.Д. Исследование влияния газа, содержащегося в нефти на показания преобразователей объемного расхода нефти. – М.: Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 4. – С. 43–45.

3. Демьянов А.А. О проблемах определения содержания воды при учете сырой нефти // Нефтедобыча: междунар. Интернет-журн. 3.07.04. URL: http:www.teplopunkt.ru/articles/0049_daa_nft.html (дата обращения: 12.12.03).

4. Калабин Г.А., Полонов В.М., Смирнов М.Б. Количественная Фурье-спектроскопия ЯМР в химии нефти. Обзор // Нефтехимия. – 1986. – Т. XXVI, № 4. – С. 435–563.

5. Кашаев Р.С., Малацион С.Ф., Самигуллин Ф.М., Матухин В.Л. Температурная зависимость параметров и методика экспресс-анализа топливных водо-битумных эмульсий на основе метода ЯМР // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2003. – № 11–12. – С. 3–11.

6. Патент 2544360 Российская Федерация. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ЯМР / Кашаев Р.С., Темников А.Н., Идиятуллин З.Ш.; заяв. и патентообладатель КГЭУ, заявл. 20.03.2015; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 8. – 7 с.

7. Кашаев Р.С., Темников А.Н., Идиятуллин З.Ш. Способ измерения влажности нефти и нефтепродуктов // Заявка Росс.Федерация, № 95117256/25; заявл. 10.12.1995, опубл. 1997, Бюл. № 28. – 3 с.

8. Кашаев Р.С. Аппаратура и методики ЯМР-анализа нефтяных дисперсных систем [Текст] / Кашаев Р.С. – Lambert Academic Publishing. Saarbruchen. 2012. – 91 с.

9. Опыт внедрения многофазных расходомеров Agar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.agar.ru/ technology/introduction_mpfm.php (дата обращения: 12.03.12).

10. Тоски Э., Ханссен Б.В., Смит Д. Three Phase Measurements [Текст] / Проспект Schlumberger, Берген, Норвегия, 2007.

11. Albert K., Bayer E. High performance liquid chromatography-nuclear magnetic resonance on-line coupling // Trends in analytical chemistry. – 1988. – V.7, № 8. – P. 288–292.

12. Hahn E.L. // J. Geograph. Res. – 1960. – V.65. – P.776–789.

13. Jiskoot J.J. Considerations for crude oil sampling. «Control and Instrumentation». – 1987. – T. 19, № 5. – P. 127–128.

14. Kashaev R.S., Temnikov A.N., Idiatullin Z.Sh., Charitonov M.V., Farachov T.I. NMR-Analyser for Automatic Control of Physical-Chemical Parameters of Crude Oil and Bitumen // Ext. Abstracts XXVIII Ampere Congress, Canterbury, England, 1996. – P. 295–296.

15. Kashaev R.S. Oil Disperse Systems Study Using Nuclear Magnetic Resonance Relaxometry (NMRR). // Advances in Energy Research. – 2013. – V.16. – 68 p. E-book «Nova Science Publishers, Inc.» ID 12590, N-Y. USA.