

УДК 621.771.3

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор
Ю. Н. Шелковникова
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Выполнен обзор методов и средств определения реологических свойств буровых растворов. Показано, что для исследования реологических характеристик буровых растворов целесообразно использовать вискозиметры с капиллярами, выполненными в виде кольцевого зазора. Предложена комплексная методика определения типа бурового раствора и реологических характеристик вязкопластических жидкостей, а также устройство для ее реализации.

Ключевые слова: буровой раствор, промывка скважин, реологические характеристики, вискозиметры.

Буровой раствор является средой, через которую передается гидравлическая мощность от наземного оборудования долоту. Разрушенная порода удаляется с забоя потоком раствора, непрерывно подаваемого по колонне бурильных труб. Крутящий момент на долото передается или с поверхности от вращателя (ротора) через колонну бурильных труб (ротаторное бурение) или от забойного двигателя (турбобура, электробура, винтового бура), установленного непосредственно над долотом. Поэтому при составлении технической карты применения буровых растворов необходимо учитывать гидравлику. Это значит, что скорость циркуляции бурового раствора должна быть такой, при которой можно использовать максимальную гидравлическую мощность, обеспечивающую очистку забоя. Основными факторами, влияющими на очистку скважины от шлама, являются реологические свойства бурового раствора – пластическая вязкость μ и предельное напряжение сдвига τ_s , поэтому их значения должны поддерживаться на оптимальном уровне. При проектировании параметров буровых растворов всегда нужно стремиться к тому, чтобы достигались высокие скорости бурения, высококачественное вскрытие продуктивных пластов, предупреждались всевозможные осложнения [1].

Наилучшие результаты работы долот имеют место, когда выбуренная порода своевременно удаляется из забоя. Чистота забоя скважины, а следовательно, и процесс бурения зависят от следующих факторов.

1. Качество бурового раствора. Очистка скважины от мелкого шлама лучше обеспечивается при глинистых растворах с малой вязкостью и малой прочностью структуры. Крупные куски шлама лучше удаляются при густых и вязких растворах. Подъемная способность глинистых растворов повышается с увеличением плотности, при этом увеличивается давление на забой скважины, сопротивляемость пород разрушению возрастает, вследствие чего показатели бурения уменьшаются.

2. Количество бурового раствора, подаваемого на единицу площади забоя скважины. На основании обобщения экспериментальных исследований установлено (исследования проводились при бурении роторным способом и электробуром), что технологически необходимое количество промывочного рас-

твора $G = 0,07S_3$ [л/с], где 0,07 – переводной коэффициент; S_3 – площадь забоя скважины, см². Повышение подачи буровых насосов над вычисленной по данному соотношению величиной не приводит к существенному изменению механической скорости проходки [2].

3. Скорость истечения потока жидкости из отверстий долота и расположение этих отверстий по отношению к шарошкам и забю скважин. С увеличением скорости истечения бурового раствора из долотных насадок улучшается очистка забоя скважины, а следовательно, возрастает механическая скорость проходки [3].

Скважина проходит через пласты породы с разной температурой, повышающейся с увеличением глубины бурения, что приводит к нагреву бурового раствора при течении в кольцевом зазоре и к изменению его реологических характеристик μ и τ_s . Потери давления при подаче бурового раствора в скважину определяются этими основными реологическими характеристиками. При большой глубине бурения необходимо рассматривать процесс прогрева ствола скважины.

Экспериментальные исследования реологических свойств разнообразных вязкопластических жидкостей производят с помощью специальных контрольно-измерительных приборов – вискозиметров [4, 5]. Можно выделить два основных метода определения реологических характеристик вязкопластических жидкостей. Первый заключается в непосредственном установлении связи напряжения сдвига со скоростью сдвига путем приложения к образцу однородного сдвига в специально сконструированном приборе и измерения соответствующего напряжения сдвига. Вискозиметры, использующие этот принцип, обычно представляют собой ротационные устройства в виде соосных цилиндров или конуса и пластины. Во втором методе зависимость между напряжением и скоростью сдвига устанавливается косвенным способом по измерениям перепада давлений и расходу жидкости в прямолинейном канале или в устройствах с капиллярной трубкой.

В целом, все наиболее широко применяемые вискозиметры можно разделить на несколько типов (рис. 1) [6–8].

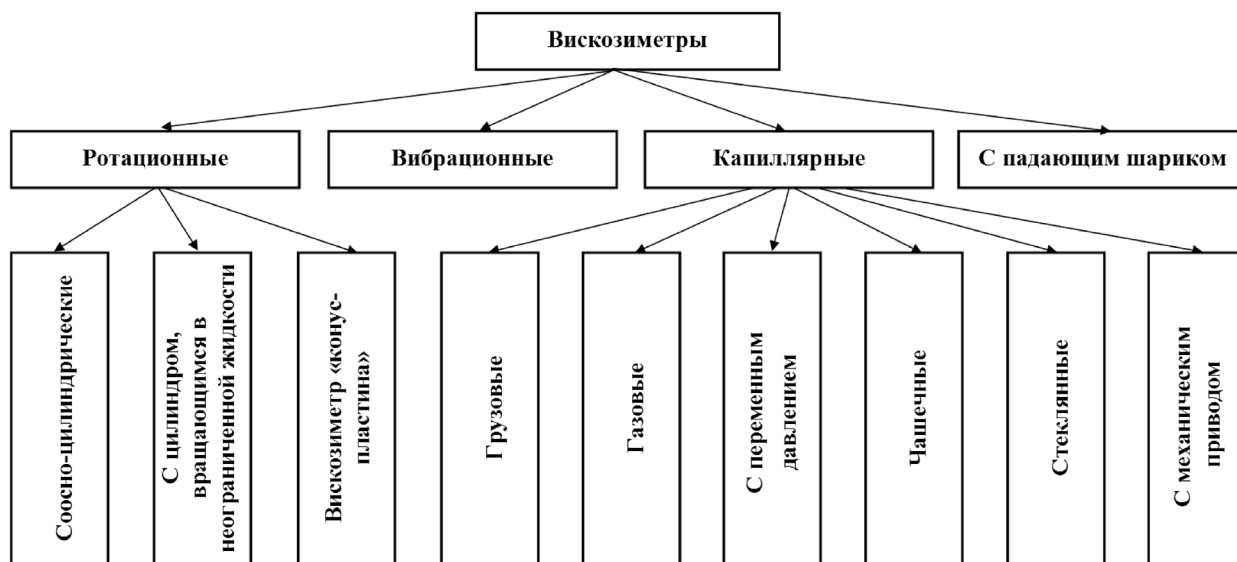


Рис. 1. Классификация вискозиметров

Ротационные вискозиметры существуют трех видов: соосно-цилиндрические; цилиндр, вращающийся в неограниченной жидкости, и вискозиметры «конус-пластина». Они имеют сложную конструкцию и трудоемки при изготовлении. Схема течения смазки в ротационных приборах не соответствует течению смазки в кольцевых трубах. Вискозиметры, основанные на измерении вязкости смазок путем определения скорости падения шарика или груза, пригодны для исследования материалов, обладающих сравнительно небольшими вязкостями. При высоких давлениях использовать вискозиметры этого типа неудобно, поскольку с ростом давления вязкость жидкости значительно увеличивается, и поэтому шарик падает очень медленно [9]. Кроме того, использование данного способа измерения вязкости неоправданно, если результаты будут использоваться к процессам устанавливающегося течения в потоке заданной формы с определенной конфигурацией рабочих органов вискозиметра. У приборов для условных измерений с падающим шариком кроме неоднородности сдвига отсутствует стационарность. Это также относится к вибрационным вискозиметрам. Они дают лишь относительное значение эффективной вязкости.

Достоверность результатов измерений реологических характеристик буровых растворов обеспечивается только в условиях стационарного ламинарного течения. Поэтому методы измерений должны давать возможность соблюдения стационарности потоков исследуемой жидкости и независимости результатов от размеров измерительной части прибора, исключения искажающих эффектов (концевых, пристенного скольжения, температурных). Следует отметить, что в задачах течения жидкости по трубам в виде кольцевого зазора (например, течение буровых растворов и др.) для исследования реологических свойств жидкости целесообразно использовать капиллярные вискозиметры с капиллярами, выполненными также в виде кольцевого зазора.

При промывке скважины необходимо контролировать, к какому типу неньютоновских жидкостей относится буровой раствор (рис. 2), так как от типа жидкости зависит характер его течения, а также скорость циркуляции бурового раствора и качество очистки скважины от шлама. Рассмотрим более подробно эти типы [10].

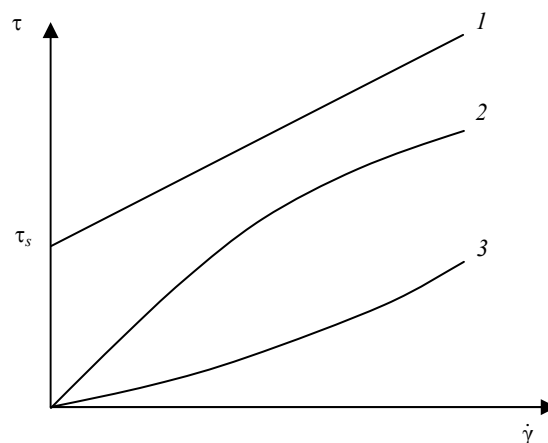


Рис. 2. Кривые течения различных типов неньютоновских жидкостей: 1 – бингамовский пластик; 2 – псевдопластическая; 3 – дилатантная

К бингамовским пластическим относят жидкости, имеющие начальный предел текучести, ниже которого они проявляют себя как твердые тела. Кривая течения 1 (рис. 2) для этих материалов представляет прямую линию, пересекающую ось напряжения сдвига на расстоянии τ_s , превышение которого приводит к возникновению вязкого течения. Реологическое уравнение для бингамовских пластиков можно записать в виде: $\tau - \tau_s = \mu \cdot \dot{\gamma}$; $\tau > \tau_s$, где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; μ – пластическая вязкость, численно равная тангенсу угла наклона кривой течения. Данный тип жидкости наиболее целесообразно использовать для промывки скважин в качестве буровых

растворов, так как именно вязкопластические растворы обеспечивают необходимый уровень очистки забоя от разрушенной долотом породы и вынос шлама из скважины. При этом они удерживают частицы шлама во взвешенном состоянии при технологическом или аварийном прекращении циркуляции бурового раствора, а также позволяют выносить шлам на поверхность при меньшей скорости восходящего потока жидкости.

Исследования процессов, происходящих при бурении скважин, опыт их строительства показывает, что в качестве буровых растворов также можно использовать псевдопластические жидкости. Псевдопластические жидкости не имеют предела текучести, и кривая течения 2 (рис. 2) у них показывает, что кажущаяся вязкость (отношение напряжения сдвига к скорости сдвига) постепенно понижается с ростом скорости сдвига. Кривая течения становится линейной только при очень больших по величине скоростях деформации сдвига.

К дилатантным неньютоновским относятся жидкости с большим содержанием твердых частиц (кривая течения 3). При движении с небольшим градиентом скорости жидкость играет роль смазки между твердыми частицами и уменьшает трение. При дальнейшем увеличении градиента скорости жидкость ведет себя как ньютоновская. Дилатантные жидкости сходны с псевдопластиками тем, что в них также отсутствует предел текучести, однако их кажущаяся вязкость повышается с возрастанием скорости сдвига [11].

Реологические свойства каждой отдельной жидкости зависят от скорости сдвига. Жидкость, ведущая себя как бингамовская в одном диапазоне сдвигов, в другом диапазоне становится псевдопластической, а при больших скоростях сдвига начинает проявлять свойства ньютоновской жидкости. Поэтому при регулировании свойств буровых растворов важную роль играет своевременное получение точной информации о реологических характеристиках бурового раствора.

В работе предложена комплексная методика определения реологических характеристик бурового раствора для установления типа исследуемой жидкости (вязкопластической, псевдопластической, дилатантной) [12] и в случае вязкопластической жидкости последующего точного вычисления пластической вязкости μ и предельного напряжения сдвига τ_s . Алгоритм реализации методики приведен на рис. 3. Применение предложенной методики обеспечивает возможность создания простых и одновременно прецизионных вискозиметров [13].

На рис. 4 приведена структурная схема устройства для реализации предложенной методики (где РЖ –

резервуар с исследуемой жидкостью; СУ – силовая установка для обеспечения прокачивания жидкости через капилляры К1, К2 одинакового кольцевого сечения различной длины l_1, l_2 ; ВХК1, ВХК2 – входные камеры; ВК1, ВК2 – выходные камеры с измерителями расхода жидкости; ДМ1, ДМ2 – дифференциальные манометры (с электрическими выходами); МП – микропроцессор со встроенным аналого-цифровым преобразователем). Устройство работает следующим образом. Силовая установка СУ воздействует на резервуар РЖ с исследуемой жидкостью, который подсоединен к входным камерам ВК1 и ВК2. Исследуемая жидкость прокачивается через капилляры К1, К2, при этом дифференциальные манометры ДМ1, ДМ2 измеряют перепады давления на концах этих капилляров (подсоединенных, соответственно, к входным камерам ВХК1, ВХК2 и к выходным камерам ВК1, ВК2 с измерителями расхода жидкости). Данные с манометров ДМ1, ДМ2, а также с расходомеров, расположенных в выходных камерах ВК1 и ВК2, поступают в микропроцессор МП, который используется для построения кривых течения жидкости и вычисления величины вязкости μ и предельного напряжения сдвига τ_s по предложенным в алгоритме (рис. 3) формулам [14] (где $h = R - R_1$; R и R_1 – соответственно, внешний и внутренний радиусы капилляров; Q_1 и Q_2 – соответственно, объемные расходы жидкости через капилляры К1 и К2).

В заключение можно сделать следующие выводы. В результате проведенного обзора методов и средств определения реологических свойств буровых растворов показано, что для исследования реологических характеристик буровых растворов целесообразно использовать капиллярные вискозиметры (с капиллярами, выполненными в виде кольцевого зазора), так как только они обеспечивают условия стационарного ламинарного течения в кольцевом канале, близкого к течению буровых растворов при промывке скважин. Предложена комплексная методика определения реологических характеристик бурового раствора и устройство для ее реализации, которая заключается в определении типа жидкости исследуемого раствора и последующего одновременного вычисления величин его пластической вязкости и предельного напряжения сдвига. Следует отметить, что данная методика может применяться не только при исследовании, но и в автоматическом контроле и регулировании реологических свойств буровых растворов на водной основе при установившейся скорости его циркуляции.

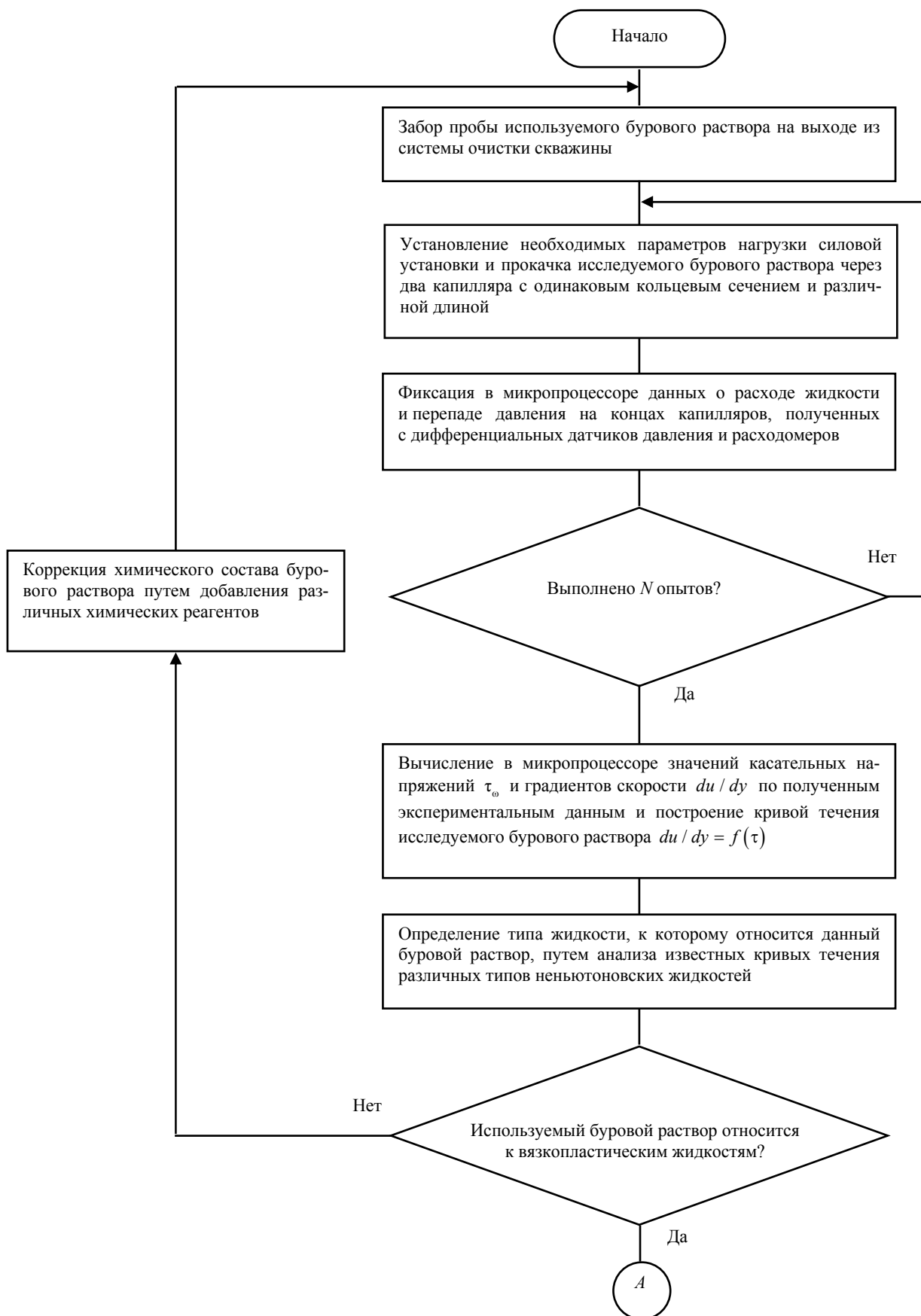


Рис. 3. Алгоритм комплексной методики определения типа жидкости бурового раствора и его реологических характеристик (см. также с. 67)

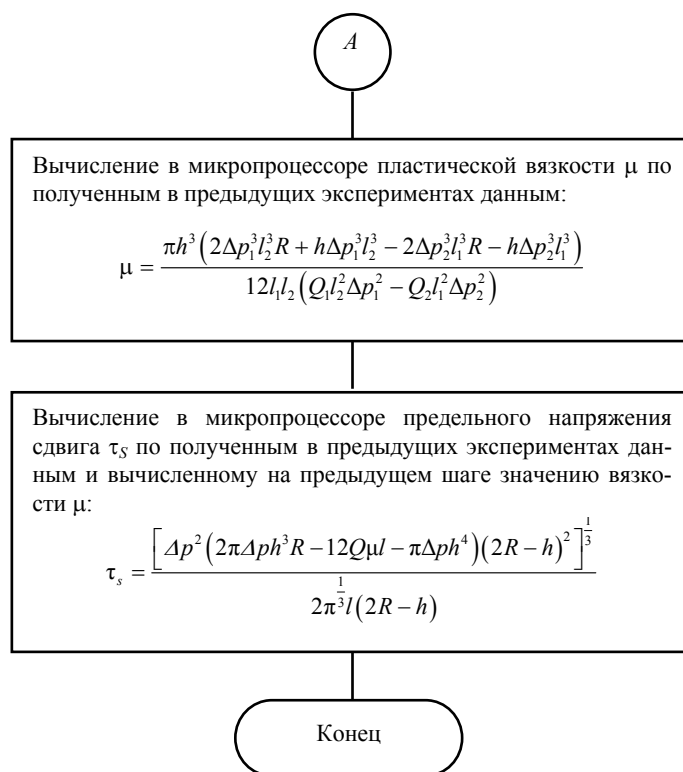


Рис. 3. Окончание

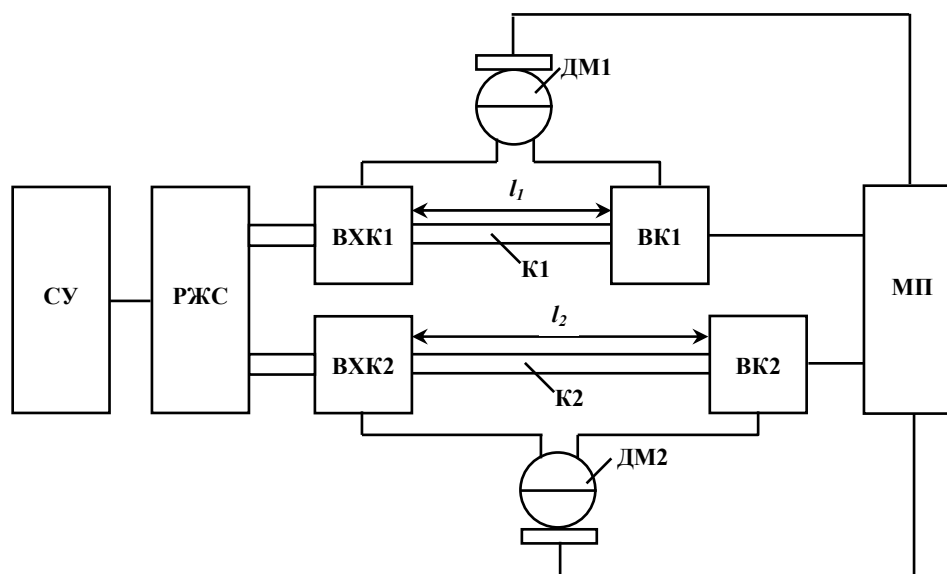


Рис. 4. Структурная схема устройства для определения реологических характеристик буровых растворов

Библиографические ссылки

1. Мавлютов М. Р. Технология бурения глубоких скважин. – М. : Недра, 1982. – 287 с.
2. Булатов А. И., Макаренко П. П., Проселков Ю. М. Буровые промывочные и тампонажные растворы : учеб. пособие для вузов. – М. : Недра, 1999. – 424 с.
3. Тенев В. А., Шелковникова Ю. Н. Управление чистой забой скважины реологическими характеристиками бурового раствора при неизотермическом режиме бурения // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2 (22). – С. 31–34.

4. Демихов В. И., Леонов А. И. Контрольно-измерительные приборы при бурении скважин. – М. : Недра, 1980. – 304 с.
5. Фукс Г. И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. – М. : Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. – 328 с.
6. Малкин А. Я., Исаев А. И. Реология: концепции, методы, приложения. Пер. с англ. – СПб. : Профессия, 2007. – 560 с.
7. Кремлевский В. П., Степичев А. А. Вибрационные вискозиметры. – М. ; Л. : Машиностроение, 1968. – 24 с.

8. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости. – М. : Мир, 1964. – 216 с.

9. Демихов В. И., Леонов А. И. Контрольно-измерительные приборы при бурении скважин. – М. : Недра, 1980. – 304 с.

10. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости. – М. : Мир, 1964. – 216 с.

11. Там же.

12. Патент РФ №2434221. Способ определения реологических характеристик неньютоновских жидкостей / И. Б. Покрас, Г. А. Чикуров, Ю. Н. Шелковникова. – № 2003132600 ; опубл. 04.05.2010.

13. Патент РФ № 2244286. Способ определения реологических характеристик вязкопластических жидкостей / И. Б. Покрас, Ю. Н. Шелковникова. – № 2003132600; заявл. 06.11.2003; опубл.10.01.2005. Бюл. № 1.

14. Там же.

Yakimovich B. A., DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU
Shelkovnikova Yu. N., Kalashnikov ISTU

Methods and means of measuring the rheological characteristics of drilling muds

The paper presents the review of methods and means of determining the rheological characteristics of drilling muds. It is shown that it is reasonable to use the viscometers with capillaries in the form of a ring gap for investigation of the rheological characteristics of drilling muds. The complex system to define the drilling mud type and rheological characteristics of viscous-plastic liquids and the device for its implementation are offered.

Keywords: drilling mud, washing of wells, rheological characteristics, viscometers

Получено: 02.02.16