© Н.Н. Арефьев, С.М. Штин, 2007

УДК 553.543

Н.Н. Арефьев, С.М. Штин

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САПРОПЕЛЯ

Для расчета течения сапропеля по каналам гидроаппаратов (насосов) и по трубопроводам необходимо знать его реологические характеристики. Известно, что сапропели обладают свойствами неньютоновских жидкостей, а течение их с достаточной степенью приближения может быть описано уравнением Бингама - Шведова [1, 2]:

$$p = p_0 + \eta_{пл} \frac{dV}{dR}, \qquad (1)$$

где p – напряжение сдвига; p_0 – предельное напряжение сдвига; $\eta_{пл}$ – коэффициент вязкости; dV / dR – градиент скорости сдвига.

Характер реологического поведения той или иной жидкости или дисперсии и ее реологические параметры можно с достаточной точностью определить, лишь изучив процесс ее течения. В практике реологических исследований широко применяют капиллярный и ротационный вискозиметры [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Наиболее широкое распространение получили ротационные вискозиметры с коаксиальными цилиндрами. Исследования реологических параметров вязкопластичных жидкостей чаще всего проводят на ротационных вискозиметрах системы М.П. Воларовича РВ-4, РВ-7, РВ-8, которые по величине зазора относятся к группе интегральных приборов. Стандартные методики вискозиметрических измерений позволяют определить значения эффективной вязкости при фиксированных скоростях вращения ротора вискозиметра, а также определять предельные напряжения сдвига при течении однородных консистентных смазок, коллоидных растворов, высокомолекулярных соединений или тонкодисперсных систем [11]. Однако сапропели содержат грубодисперсные частицы и структурные агрегаты, превышающие по размерам зазоры вискозиметров, в результате при измерениях наблюдается заклинивание роторов вискозиметров. Необоснованное увеличение зазоров приводит к нарушению однородности полей напряжений и скоростей деформаций, что приводит к искажению ожидаемых результатов. Кривые течения дисперсных систем, полученные в результате опытов по стандартным методикам измерений на вискозиметрах системы М.П. Воларовича, имеют расхождения: при заданной величине касательного напряжения большим радиусам соответствуют меньшие значения градиентов скоростей.

По мнению П.А. Ребиндера, Н.Н. Кулакова, М.П. Воларовича, М. Рейнера, Дж. Олдройда основной причиной расхождения получаемых значений реологических параметров и зависимости этих параметров от геометрических размеров вискозиметров является пристенное скольжение. На необходимость учета пристенного скольжения при рас-

четах течения вязкопластичных жидкостей указывается в работах М. Муни, Грина, Скотт-Блера, А.П. Юфина, А.Х. Кима, Д.М. Толстого, В.В. Синицыны, Г.В. Виноградова. Эффект пристенного скольжения можно представить себе как результат повышения текучести в пристенном слое по сравнению с текучестью в объеме. Первая экспериментальная работа, в которой было обнаружено пристенное скольжение дисперсных систем, была выполнена в 1920 г. Грином [12]. Воларович М.П. и Кулаков Н.Н., проводившие наблюдения для торфомассы, получили значение пристенного слоя воды порядка 0,15 мкм [13, 14]. Причем в стальных трубах эффект оказался значительно большим, чем в стеклянных трубах. Однако коэффициент пристенного скольжения значим только для течения дисперсных систем. Гипотеза прилипания к стенке для низкомолекулярных систем завоевала сейчас всеобщее признание. Влияние проскальзывания на расход воды оказывается едва уловимым (≤ 5 %) в самом благоприятном случае в опытах Шнелла [15]. Поэтому во всех исследованиях эффекта пристенного скольжения [13, 14, 16, 17] предполагается, что дисперсионная среда прилипает к стенке. Пристенное скольжение дисперсных систем по мнению Толстого Д.М. [13] связано с существованием пристенных слоев дисперсионной среды, средняя толщина которых может достигать порядка микрометра, а в грубодисперсных системах и значительно большей величины. На практике для устранения проскальзывания применяют роторы вискозиметров с рифлеными поверхностями рабочих цилиндров. Однако применение рифленых измерительных поверхностей не является гарантией полного устранения пристенного эффекта. Это следует уже хотя бы из того, что существенную роль играет профиль рифлений, особенно профиль внешних частей выступов. Кроме того, опыты на рифленых поверхностях допустимо проводить только при невысоких скоростях деформаций, так как после разрушения структуры в быстро движущемся потоке испытуемой жидкости рифления могут вызывать сильные возмущения [6]. Поэтому такой путь устранения скольжения не является строгим и вполне надежным. Пристенное сколь-жение можно оценить по методу М. Муни для вискозиметров с коаксиальными цилиндрами [18]. В этом случае необходимо проводить опыты на приборах с набором не менее четырех пар коаксиальных цилиндров различных радиусов, что очень усложняет и удорожает проведение опытов.

Наиболее широко исследователи применяют метод анализа потерь напора в трубах, основанный на теории капиллярной вискозиметрии. При этом зависимость гидравлического уклона от скорости движения исследуемой жидкости в трубопроводе аппроксимируют уравнением Букингэма, принимают линейное распределение касательных напряжений сил трения по живому сечению трубопровода [19, 20]. Большинство исследователей отмечают условный характер получаемых реологических характеристик, их зависимость от диаметров трубопроводов, а также от конструкционного материала трубопровода [10, 21, 22]. Неинвариантность реологических характеристик можно объяснить тем, что метод анализа потерь напора не учитывает эффект пристенного сколь-жения. Букингэм впервые ввел поправку на пристенное скольжение в капиллярном вискозиметре. Она выражается добавочным объемом ΔQ истечения в секунду,

обусловленным скольжением вязкопластичной («бингамовской») жидкости по стенке [14]. На режимах установившегося течения пристенное скольжение может быть количественно оценено по методу М. Муни, который в случае капиллярной вискозиметрии дает блестящие результаты [6, 18]. Такой подход к оценке реологических характеристик кормовых смесей использовали В.С. Мкртумян и В.В. Переведенцев [21] и рекомендовали его к практическому применению при исследовании вязкопластичных жидкостей. Сущность метода состоит в следующем. Необходимо экспериментально изучить напорно-расходные характеристики при течении исследуемого материала в горизонтальных трубах минимум четырех – пяти диаметров не менее 0,05 м. По экспериментальным данным следует построить зависимости эффективного градиента скорости $D_e = \frac{Q}{\pi R^3}$ от касательных напряжений сдвига τ_R на стенках трубопровода, то есть интегральные реологические кривые. Их расхождение для различных диаметров трубопроводов свидетельствует о наличии пристенного скольжения.

По интегральным кривым находят зависимости $D_e(1/R)$ при $\tau_R = const$ и по их виду судят о характере зависимости скорости скольжения от напряжений сдвига. Экстраполированием функции $D_e(1/R)$ при $\tau_R = const$ до $1/R \cong 0$ находят градиент скорости в объемных слоях исследуемого материала. Путем многократных повторений последней операции при разных τ_R находят полную реологическую кривую течения исследуемого материала [21]. В результате удается определить инвариантные реологические характеристики, независящие от размеров трубопроводов, а также оценить скорости скольжения исследуемого материала относительно стенок трубопроводов.

Очевидно, что такой метод обладает рядом достоинств: получение инвариантных реологических характеристик, возможность оценки скорости скольжения исследуемого материала по стенке трубопровода, а следовательно, возможность учета этой скорости в расчетных методиках трубопроводного гидротранспорта вязкопластичных жидкостей. Но наряду с вышеперечисленными достоинствами очевидны и недостатки этого метода: громоздкость оборудования, высокая трудоемкость исследовательских работ.

Основываясь на теоретических исследованиях течения вязкопластичных жидкостей с гидросмазкой под действием перепада давления в круглом канале, выполненных в [23], а также на экспериментальных исследованиях течения вязкопластичных жидкостей [21], достаточно точно описываемых реологическим уравнением Бингама – Шведова, разработаем упрощенный метод определения реологических характеристик.

Можно предположить, что проскальзывание при течении по трубам вязкопластичных жидкостей обусловлено образованием тонкой пленки из жидкости, менее вязкой, чем исследуемая. Эта пленка образуется на внутренней поверхности трубы и толщина ее составляет δ. Также можно предположить, что эта пленка образована дисперсионной средой и является ньютоновской жидкостью с коэффициентом динамической вязкости μ. Например, для сапропеля или торфомассы дисперсионной средой является вода. На основании этих предположений и результатов исследований [23] можем написать выражение для определения расхода вязкопластичной жидкости с гидросмазкой при течении по трубе:

$$Q = \pi R^2 V_S + \frac{\pi R^3}{4\eta_{пл}} P_W \left[1 - \frac{4}{3}\frac{p_0}{P_W} + \frac{1}{3}\left(\frac{p_0}{P_W}\right)^4 \right] \quad (2)$$

где P_W – напряжение сдвига на стенке трубы; V_S - скорость скольжения.

Если обе части выражения (2) разделить на πR^3 , то получим

$$\frac{Q}{\pi R_3} = \frac{V_S}{R} + \frac{P_W}{4\eta_{пл}} \left[1 - \frac{4}{3}\frac{p_0}{P_W} + \frac{1}{3}\left(\frac{p_0}{P_W}\right)^4 \right]. \quad (3)$$

Левая часть выражения (3) представляет собой эффективный градиент скорости D, вычисленный по среднеобъемной скорости потока, первый член правой части – градиент скорости в пристенном слое, второй – величину, пропорциональную градиенту скорости в объемных слоях.

На основании исследований [23] можно написать выражение для определения V_S и P_W:

$$V_S = \frac{P_W \delta}{\mu}, \quad (4)$$

$$P_W = \left(-\frac{\partial p}{\partial z}\right)\frac{R}{2}, \quad (5)$$

где $\left(-\frac{\partial p}{\partial z}\right)$ - градиент давления вдоль оси канала.

Если (4) с учетом (5) ввести в первый член уравнения (2), то получим известное уравнение Букингэма [14] добавочного расхода с учетом пристенного скольжения:

$$\Delta Q = \frac{\pi R^3 \delta}{2\mu}\frac{\Delta P}{l}.$$

Это свидетельствует о верности теоретических основ для разработки нового метода реологических исследований.

На основании экспериментальных данных, полученных при исследовании реологических характеристик смесей [21], которые можно отнести к жидкостям Бингама, было получено, что скорость скольжения V_S можно определить по формуле:

$$V_S = \frac{a}{R^2}\left(P_W - b\right), \quad (6)$$

где a и b – величины, зависящие от свойств вязкопластичной жидкости.

Приравнивая правые части выражений (4) и (6), получим

$$\delta = \frac{\mu a}{R^2}\left(1 - \frac{b}{P_W}\right). \quad (7)$$

Таким образом, по формуле (7) можно определить толщину смазывающего пристенного слоя δ в зависимости от свойств вязкопластичной жидкости, радиуса трубы и напряжения сдвига на стенке трубы. Из уравнения (3) с учетом (6) получим:

$$D = \frac{a}{R^3}\left(P_W - b\right) + \frac{P_W}{4\eta_{пл}}\left[1 - \frac{4}{3}\frac{p_0}{P_W} + \frac{1}{3}\left(\frac{p_0}{P_W}\right)^4 \right]. \quad (8)$$

Уравнение (8) справедливо для ламинарного установившегося изотермиического течения. На основании уравнения (8) разработан новый метод экспериментальных исследований, которые проводятся при движении вязкопластичной жидкости по двум трубам с радиусами R_1 и R_2. При этом замеряются эффективные градиенты скорости $(D_{Rj})_i$ и напряжения сдвига на стенках P_{Wi}. Тогда на основании уравнения (8) можно написать для одинаковых напряжений P_{Wi} для обоих диаметров труб:

$$\left(D_{R1}\right)_{P_{Wi}} = \frac{a}{R_1^3}\left(P_{Wi} - b\right) + \\ + \frac{P_{Wi}}{4\eta_{пл}}\left[1 - \frac{4}{3}\frac{p_0}{P_{Wi}} + \frac{1}{3}\left(\frac{p_0}{P_{Wi}}\right)^4\right], \\ \left(D_{R2}\right)_{P_{Wi}} = \frac{a}{R_2^3}\left(P_{Wi} - b\right) + \\ + \frac{P_{Wi}}{4\eta_{пл}}\left[1 - \frac{4}{3}\frac{p_0}{P_{Wi}} + \frac{1}{3}\left(\frac{p_0}{P_{Wi}}\right)\right]. \quad (9)$$

Из системы уравнений (9) получим для $j \neq k$

$$\left(D_{R1}\right)_{P_{Wj}} - \left(D_{R2}\right)_{P_{Wj}} = a\left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3}\right)\left(P_{Wj} - b\right), \\ \left(D_{R1}\right)_{P_{Wk}} - \left(D_{R2}\right)_{P_{Wk}} = a\left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3}\right)\left(P_{Wk} - b\right). \quad (10)$$

Если поделить правые и левые части уравнений системы (10) соответственно, то получим

$$\frac{\left(D_{R1}\right)_{P_{Wj}} - \left(D_{R2}\right)_{P_{Wj}}}{\left(D_{R1}\right)_{P_{Wk}} - \left(D_{R2}\right)_{P_{Wk}}} = \frac{P_{Wj} - b}{P_{Wk} - b}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) определяется значение b. Из одного из уравнений (10) определяется значение a:

$$a = \frac{\left(D_{R1}\right)_{P_{Wj}} - \left(D_{R2}\right)_{P_{Wj}}}{\left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3}\right)\left(P_{Wj} - b\right)}. \quad (12)$$

Из системы уравнений (9) можем написать для $j \neq k$:

$$\frac{\left(D_{R1}\right)_{P_{Wj}} - \frac{a}{R_1^3}\left(P_{Wj} - b\right)}{\left(D_{R2}\right)_{P_{Wk}} - \frac{a}{R_2^3}\left(P_{Wk} - b\right)} = \frac{P_{Wj} - \frac{4}{3}p_0 + \frac{1}{3}\frac{p_0^4}{P_{Wj}^3}}{P_{Wk} - \frac{4}{3}p_0 + \frac{1}{3}\frac{p_0^4}{P_{Wk}^3}}. \quad (13)$$

Из уравнения (13) определяется значение p_0. Значение $\eta_{пл}$ можно определить из выражения:

$$\eta_{пл} = \frac{P_{Wj}\left[1 - \frac{4}{3}\frac{p_0}{P_{Wj}} + \frac{1}{3}\left(\frac{p_0}{P_{Wj}}\right)^4\right]}{4\left[\left(D_{R1}\right)_{P_{Wj}} - \frac{a}{R_1^3}\left(P_{Wj} - b\right)\right]}. \quad (14)$$

Следовательно, вновь разработанный метод определения реологических характеристик вязкопластичной жидкости позволяет сократить объем исследовательских работ по сравнению с известным методом М. Муни. При этом необходимо отметить, что в прежнем методе М. Муни применяется графоаналитический метод обработки экспериментальных данных для получения реологических характеристик [21], в то время как во вновь разработанном – чисто аналитический, что свидетельствует о большей достоверности получаемых результатов по новому методу.

Для проверки разработанного метода были использованы результаты экспериментальных исследований течения кормовых смесей [21], которые относятся к жидкостям Бингама. В работе [21] на лабораторном стенде были исследованы реологические характеристики кормовых смесей по методу М. Муни: каждую кормовую смесь транспортировали по пяти трубам с радиусами 25, 40, 52, 65 и 75 мм. При этом на разных режимах выполнялись следующие замеры: потери давления на отрезке трубы и объемный расход жидкости. По известным формулам авторами [21] были вычислены напряжения сдвига на стенке трубы P_W и эффективные градиенты скорости D. Результаты замеров представлены в виде зависимостей $D = f(P_W)$ для всех типоразмеров труб и смесей.

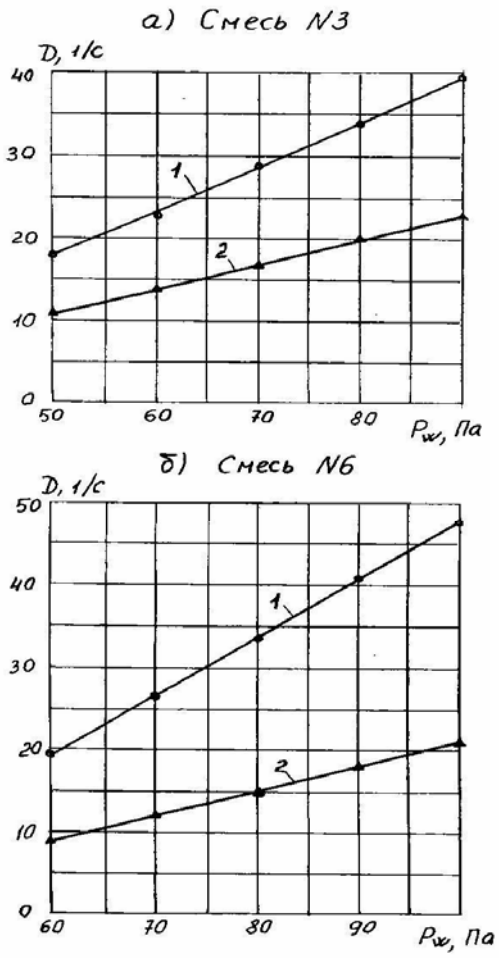

Рис. 1

1 - труба диаметром 80 мм
2 - труба диаметром 130 мм

Для проведения проверки разработанного метода исследований были взяты экспериментальные данные из [21] для двух смесей (№3 и №6) при течении их по двум трубам радиусами 25 и 52 мм. На основании опытных данных с помощью вновь разработанного метода исследований были рассчитаны реологические характеристики смесей №3 и №6. По рассчитанным реологическим характеристикам смесей №3 и №6 были вычислены эффективные градиенты скоростей D по (8) для труб радиусами 40 и 65 мм. Теоретически полученные параметры $D = f(P_W)$ сравнивались с имеющимися зависимостями, определенными экспериментально на лабораторном стенде [21]. На рисунке показаны теоретически полученные кривые зависимости $D = f(P_W)$ для труб радиусами 40 и 65 мм и экспериментальные значения [21] (рис. 1,а – смесь №3, рис. 1б – смесь №6). Сравнение показывает, что максимальная относительная погрешность между теоретически и экспериментально полученными зависимостями не превышает 0,5 %, откуда можно сделать вывод, что разработанный метод определения реологических характеристик вязкопластичной жидкости по результатам исследований на двух трубах позволяет получать достоверные данные, обеспечивающие расчет режимов течения вязкопластичной жидкости по трубам различных диаметров с высокой степенью точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Методические* указания по расчету гидравлического транспорта сапропелей. Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР. Главнечерноземводстрой. ВНИИГиМ

им. А.Н. Костякова. (Утверждены НТС Главнечерноземводстроя при Минводхозе СССР, протокол № 216 от 20.11.80 г.). - М., 1981. – 53 с.

2. *Лопотко М.З., Лецко А.П., Дубинин С.К.* Рекомендации по технологии промышленной добычи сапропелей из открытых водоемов для удобрений. (Академия наук Белорусской ССР. Институт торфа). – Минск: Наука и техника, 1981. - 78 с.

3. *Воларович М.П.* Исследование реологических свойств дисперсных систем. // Коллоидный журнал, т. XVI, №3, 1954, с. 227 – 240.

4. *Лиштван И.И.* Микро- и макрореология дисперсных систем. – Минск: 1975. – 39 с.

5. *Косаревич И.В.* Структурообразование в дисперсиях сапропелей. – Минск: Наука и техника, 1990. – 248 с.

6. *Белкин И.М. и др.* Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.

7. *Уилкинсон У.Л.* Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен. – М.: Мир, 1964. – 216 с.

8. *Воларович М.П.* Применение методов исследования вязкости и пластичности в прикладной минералогии. // Тр. ин-та прикл. минералогии. Вып. 66, 1934, с. 46 – 52.

9. *Шищенко Р.И.* Гидравлика глинистых растворов. – Баку: Госнаучтехиздат нефтяной и горнотопливной промышленности, 1951. – 133 с.

10. *Полищук В.Г.* Разработка метода определения реологических характеристик текучих сельскохозяйственных материалов для проектирования гидромеханизации на животноводческих фермах и комплексах. // Реф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. - Саратов, 1978. – 18 с.

11. *Воларович М.П., Лазовская Н.В.* Ротационные вискозиметры для исследования реологических свойств дисперсных систем высокомолекулярных соединений. // Коллоидный журнал, т. 28, вып. 2, 1966, с. 28 – 47.

12. *Greer H.* Industrial Rheology and Rheologieal struktures. New-Jork, 1949. - p. 56.

13. *Толстой Д.М.* Скольжение жидкостей и дисперсных систем по твердым поверхностям. Дис. на соиск. учен. степ. докт. физ.-матем. наук. – М., 1953. – 349 с.

14. *Толстой Д.М.* Об эффекте пристенного скольжения дисперсных систем. Происхождение, размеры и значение эффекта. // Коллоидный журнал, 1947, т. 9, №6, с. 450 – 461.

15. *Шульман З.П., Берковский Б.М.* Пограничный слой неньютоновских жидкостей. – Минск: Наука и техника, 1966. – 238 с.

16. *Олдройд Дж. Г.* Неньютоновское течение жидкостей и твердых тел. // В кн. Реология: Теория и приложения. Под редакцией Ф. Эйриха. - М.: Изд-во ИЛ, 1962, с. 757 – 793.

17. *Metzner A.B. et al*. Jnhomogeneous flows of non-newtonian fluids: generation of spatial concentration gradients. // Journal of non-newtonian fluids Mechanies, 1979, V.5, p. 449-462.

18. *Mooney M.* Explisit formulas of slip and fluidity. // Journal Reology, V.2, №2, 1931, p. 210.

19. *Смолдырев А.Е., Сафонов Ю.К.* Трубопроводный транспорт кон-

центрированных гидросмесей. – 2 изд. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

20. *Юфин А.П.* Гидромеханизация. – М.: Стройиздат, 1974. – 222 с.

21. *Мкртумян В.С., Переведенцев В.В.* Реологические исследования полужидких кормовых смесей. // Механизация и электрофикация социалистического сельского хозяйства, 1971, №1, с. 39 – 42.

22. *Чижов А.Е.* Исследование перемещения вязкопластичных кормосмесей и воды по пластмассовым трубам и резино-тканевым рукавам. // Реф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Курск, 1974. - 19 с.

23. *Арефьев Н.Н.* Течение вязкопластичной жидкости в круглом канале с гидросмазкой. // Деп. в ЦБНТИ концерна Росречфлот 14.03.91, № 291-рф. (Опубл. в НТИО вып. 5, 1991). – М., 1991. – 12 с.

Коротко об авторах

Арефьев Николай Николаевич – кандидат технических наук, Октябрьский ССРЗ, Н. Новгород,

Штин Сергей Михайлович – кандидат технических наук, Московский государственный горный университет.