

**Коробко Б.О.<sup>1</sup>, Васильев Е.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Кандидат технических наук, доцент; <sup>2</sup>Кандидат технических наук  
Полтавский национальный технический университет имени Юрия  
Кондратюка

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ**

*Предложен метод определения реологических свойств строительных растворов разной подвижности, которые перекачиваются растворонасосами. Метод базируется на изучении взаимодействия шарика клапана с исследуемым раствором.*

**Ключевые слова:** *строительный раствор, реология, подвижность раствора.*

Дальнейшее усовершенствование средств подачи строительных растворов трубопроводами, разработка оптимальных конструкций элементов гидравлической части растворонасосов с минимальным сопротивлением нагнетанию требуют изучения взаимодействия рабочего органа и клапанных устройств с потоком перекачиваемой среды. Наиболее полно реологическое поведение строительных растворов, которые принадлежат к структурным жидкостям [1], характеризуется формулой Шведова–Бингама

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{dV}{dn}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение, Па;  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига, после достижения которого жидкость приходит в движение;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\frac{dV}{dn}$  – градиент скорости в поперечном направлении потока.

Предельное напряжение сдвига  $\tau_0$  и коэффициент динамической вязкости  $\eta$  являются основными реологическими характеристиками рассматриваемой среды и определяют характер взаимодействия потока раствора с элементами гидравлической части растворонасоса.

Значение указанных параметров меняются со временем пребывания жидкости в покое (при нулевой скорости потока) и зависят от многих факторов. Кроме того, реологические характеристики зависят от конкретных условий проведения измерений [2]. Именно этим объясняются значительные расхождения в значениях указанных параметров  $\tau_0$  и  $\eta$ , приведенных в различных литературных источниках [1, 2].

Наиболее пригодным для оценивания реологических параметров известково-песчаных растворов разной подвижности есть вискозиметр Воларовича [1]. Но он имеет довольно сложную конструкцию и нуждается в высокой точности изготовления и сборки его деталей.

Принимая во внимание вышеизложенное, нами предложен метод определения реологических свойств строительных растворов разной подвижности, который состоит в изучении взаимодействия металлического шарика с исследуемым раствором.

Рассмотрим решение задачи Стокса при обтекании шарика структурной жидкостью, реологическое поведение которой определяется законом Шведова - Бингама (1).

Характер распределения нормальных напряжений на поверхности шарика радиусом  $r$  при стационарном относительном движении шарика и жидкости со скоростью  $V_0$  представляет [3]

$$p = -\frac{3}{2} \cdot \frac{V_0 \cdot \eta}{r} \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

где  $\theta$  – центральный угол между направлением вектора скорости  $\overline{V_0}$  потока и нормалью к рассматриваемому элементу сферической поверхности шарика.

Касательные напряжения, обусловленные лишь вязкостью и градиентами скорости в приграничном слое, распределяются по поверхности шарика так [3]:

$$\tau_{\eta} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_0 \cdot \eta}{r} \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

а с учетом предельного напряжения сдвига среды  $\tau_0$  (1)

$$\tau_{\eta} = \tau_0 + \frac{3}{2} \cdot \frac{V_0 \cdot \eta}{r} \cdot \sin \theta. \quad (4)$$

Усилие, которое является мерой взаимодействия шарика со структурной жидкостью, состоит из двух компонент

$$F = F' + F''. \quad (5)$$

Формула (5) после преобразований выражений для  $F'$  и будет  $F''$  иметь вид

$$F = \int_S \tau \cdot \sin \theta dS - \int_S p \cdot \cos \theta dS, \quad (6)$$

где  $dS$  – площадь элемента поверхности шарика,  $dS = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta$ .

Подставив зависимости (2) и (4) в (6), получим формулу для определения силы сопротивления  $F$ , которая возникает при движении шарика радиусом  $r$  относительно раствора со скоростью  $V_0$ :

$$F = \int_0^{\pi} \left( \tau_0 + \frac{3}{2} \cdot \frac{V_0 \cdot \eta}{r} \cdot \sin \theta \right) \cdot \sin \theta \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sin \theta d\theta - \int_0^{\pi} \left( -\frac{3}{2} \cdot \frac{V_0 \cdot \eta}{r} \cdot \cos \theta \right) \times \quad (7)$$

$$\times \cos \theta \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sin \theta d\theta = \pi^2 \cdot r^2 \cdot \tau_0 + 6 \cdot \pi \cdot V_0 \cdot r \cdot \eta.$$

Первое слагаемое выражения (7) не зависит от структурной вязкости раствора  $\eta$  и скорости движения шарика. Второе слагаемое определяется скоростью движения  $V_0$  шарика относительно раствора.

Анализируя выражение (7), пришли к выводу, что определение реологических параметров  $\tau_0$  и  $\eta$  раствора необходимо проводить в два этапа.

Сначала определяется усилие, при котором происходит сдвиг шарика радиусом  $r$ , который находится в растворе. Это позволяет рассчитать величину  $\tau_0$  при условии, что в начале сдвига шарика его скорость относительно раствора равняется нулю. Тогда выражение (7) будет иметь вид  $F_\tau = \pi^2 \cdot r^2 \cdot \tau_0$ , откуда

$$\tau_0 = \frac{F_\tau}{\pi^2 \cdot r^2}. \quad (8)$$

Величина  $F_\tau$  определяется как разница внешней силы, при которой происходит сдвиг шарика, и архимедовой силы  $F_A$ .

Затем измеряется скорость  $V_0$  и характер движения шарика в растворе под действием постоянной внешней силы  $F$ . После определения скорости  $V_0$  и напряжения  $\tau_0$  рассчитывается на основе выражения (7) величина структурной вязкости раствора  $\eta$

$$\eta = \frac{F - \pi^2 \cdot r^2 \cdot \tau_0}{6 \cdot \pi \cdot V_0 \cdot r}. \quad (9)$$

С учетом архимедовой силы расчетные формулы (8) и (9) окончательно будут иметь вид

$$\tau_0 = \frac{F_0 - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \cdot \rho}{\pi^2 \cdot r}; \quad (10)$$

$$\eta = \frac{F - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \cdot \rho - \pi^2 \cdot r^2 \cdot \tau_0}{6 \cdot \pi \cdot V_0 \cdot r}, \quad (11)$$

где  $\rho$  – плотность исследуемого раствора, кг/м<sup>3</sup>,  $V_0$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

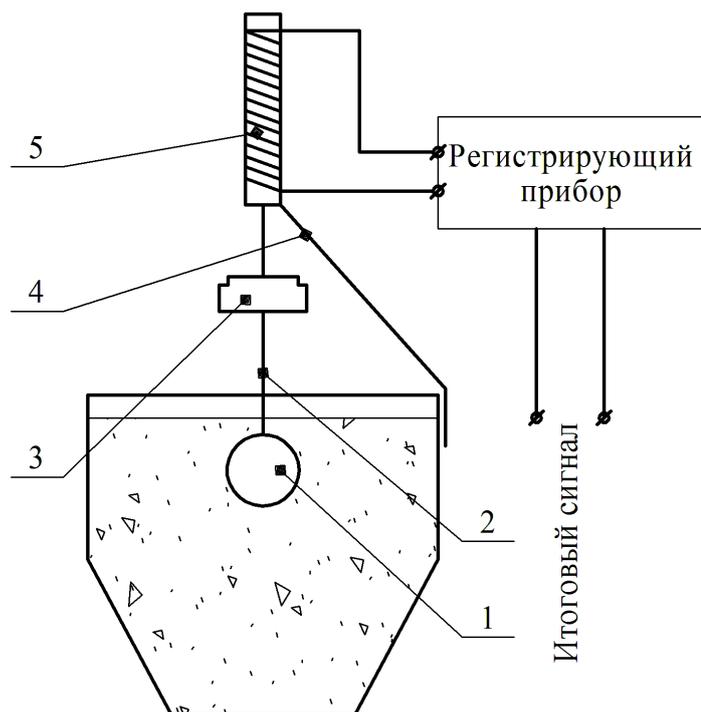


Рис. 1. Устройство для измерения реологических характеристик раствора

Для изучения взаимодействия шарика с исследуемым раствором нами использовалось устройство (см. рис. 1), которое состоит из стального шарика 1, жестко соединенного со стальным стрежнем 2. На стрежне располагалась пята 3 для нагрузки разновесами. При определении начального сдвига шарика на конце стрержня устанавливался указатель напротив соответствующей отметки шкалы, расположенной на кронштейне 4, который присоединен к бункеру смесителя. При изучении характера движения шарика в растворе на кронштейне 4 устанавливался датчик перемещения индуктивного типа 5.

Измерения выполняются таким образом. В свежеприготовленный известково-песчаный раствор состава 1:3 погружается шарик 1 так, чтобы он был полностью покрыт раствором. На пяту 3 устанавливаются последовательно разновесы так, чтобы различие в нагрузке было не больше чем 5 г. Наблюдая за указателем, фиксируем момент сдвига шарика. Плотность раствора определяется путем взвешивания фиксированного

объема раствора. Далее по формуле (10) определяется предельное напряжение сдвига  $\tau_0$  для исследуемого раствора. Подвижность раствора измеряется с помощью стандартного конуса "СтройЦНИЛ".

На рис. 2 приведена диаграмма перемещения шарика диаметром 60 мм в известково-песчаном растворе состава 1:3 и подвижностью 8 см. На диаграмме видно, что в определенный промежуток времени шарик движется с постоянной скоростью (точки 2-3), то есть процесс взаимодействия имеет стационарный характер. Анализ указанной диаграммы свидетельствует о том, что полное время опускания шарика  $T$  равняется 0,39 с (отрезок  $T = 39$  мм), а время стационарного движения шарика  $t_1 = 0,27$  с (отрезок  $t_1 = 27$  мм). Глубина погружения шарика определяется на основе результатов тарирования датчика перемещения (на диаграмме  $L = 323$  мм,  $l_1 = 255$  мм).

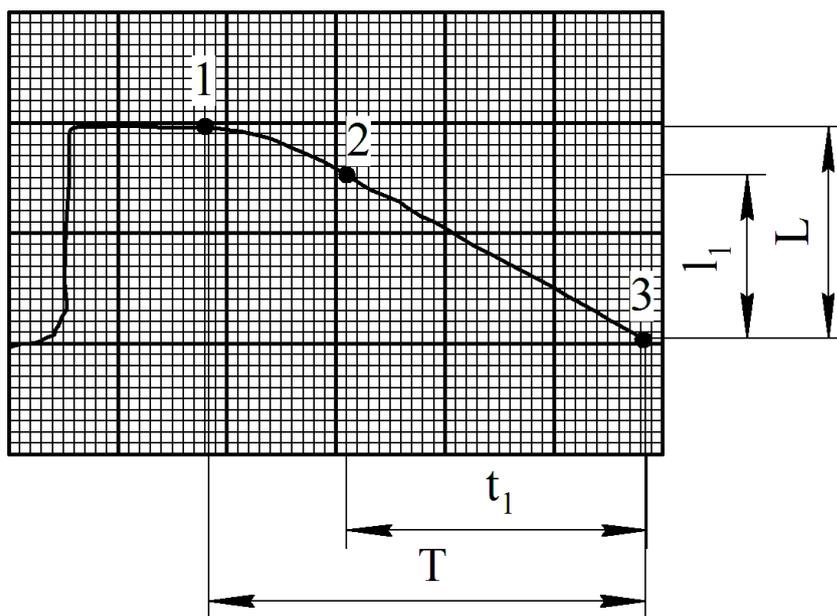


Рис. 2. Диаграмма перемещения шарика диаметром 60 мм в известково-песчаном растворе состава 1:3 и подвижностью 8 см

По указанной методике были проведены измерения с использованием известково-песчаных растворов состава 1:3 в диапазоне подвижностей от 8 до 12 см. Выборочные результаты измерений при использовании стального шарика диаметром 60 мм приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерений реологических характеристик известково-песчаных растворов разной подвижности

Подвижность , см	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$F_0$ , Н	$\tau_0$ , Па	$F$ , Н	$V_0$ , м/с	$\eta$ , Па·с
8	2100	7,75	610,2	24,07	0,94	30,53
10	2000	6,37	468,0	14,78	1,00	14,79
12	1900	4,80	303,8	10,37	0,85	11,62

Предложенная методика дает возможность оперативно определять реологические характеристики строительных растворов и других структурных жидкостей, которые подчиняются закона Шведова–Бингама, непосредственно перед их перекачиванием растворонасосом.

### Литература

1. Ивянский Г.Б. Транспорт строительных растворов по трубам. - М.: Госстройиздат, 1957. - 187 с.
2. Ивачев Л.М. Промывочные жидкости и тампонажные смеси. - М.: Недра, 1987. - 242 с.
3. Дейли Дж., Харлеман Д. Механика жидкости. - М.: Энергия, 1971. - 480 с.