

УДК 624.131

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКИХ И ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

*д.т.н., проф., Головки С.И., к.т.н., Головки А.С., асп. Шехоркина Н.Е.  
ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»*

**Постановка проблемы.** Искусственное закрепление грунтов при помощи инъекционных растворов является одним из самых эффективных методов решения геотехнических задач связанных с повышением несущей способности, устойчивости или водонепроницаемости основания. Этому вопросу посвящен целый ряд теоретических и практических работ, в которых рассматриваются основные величины, характеризующие параметры инъекции: радиусы, скорости инъектируемых жидкостей в зависимости от их свойств, рабочего давления, продолжительности нагнетания и характера пористых сред.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Теоретические решения по определению радиуса инъектирования в процессе закрепления грунта касаются инъекции только лишь вязких растворов [1, 2, 4], которые относятся к ньютоновским жидкостям и имеют ламинарный характер течения в пористой среде грунта. Как показали многочисленные исследования [5, 6], цементные суспензии и растворы относятся к вязко-пластичным жидкостям, что в свою очередь требует учета в расчетах параметров инъекции их реологических характеристик.

**Цель настоящих исследований** – установить особенности течения вязких и вязко-пластичных жидкостей в пористой среде и обосновать необходимость учета их реологических свойств при расчете радиуса распространения раствора в процессе закрепления грунтов.

**Изложение основного материала исследований.** Все жидкости обладают подвижностью, т.е. способностью течь. Наука о деформации и течении всех встречающихся в природе тел называется реологией, а свойства тел, связанных с течением и деформацией – реологическими. Оценка свойств жидкостей, определяющих их поведение при движении, связана, в первую очередь, с вязкостью.

Простейшим типом жидкости с точки зрения теории вязкости являются ньютоновские («истинные»). Истинные растворы до момента гелеобразования представляют типичные вязкие жидкости, которые по истечении некоторого времени переходят в гели, т.е. в разряд вязко-пластичных тел. К ним относятся инъекционные растворы неорганических высокомолекулярных соединений силикатных растворов и их производных и высокомолекулярные органические соединения типа карбомидных и других синтетических смол.

Ламинарное течение ньютоновских жидкостей характеризуется фиксированным набором линий тока. Это означает, что элементы жидкости, проходящие через одну и ту же точку пространства, следуют по одной и той же траектории. Мерой внутреннего трения в жидкости является вязкость,

которая остается постоянной при неизменных условиях температуры и давления и не зависит от скорости сдвига. При ламинарном течении жидкости между ее соседними слоями, в которых жидкость течет с различной скоростью, возникают касательные напряжения. Вязкая жидкость, текущая вблизи твердой поверхности прилипает к ней, поэтому на самой поверхности скорость жидкости равна нулю. Из-за прилипания и из-за вязкости жидкости появляется сила сопротивления, действующая со стороны жидкости на соприкасающееся с ней твердое тело.

Касательные напряжения ньютоновских жидкостей определяется уравнением Ньютона:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dU}{dy}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение (напряжение сдвига), МПа;  $dU/dy$  – градиент скорости, 1/с;  $\mu$  – коэффициент внутреннего трения или динамической (абсолютной) вязкости, МПа\*с.

Графически вышеприведенное уравнение представляет собой прямую, проходящую через начало координат с угловым коэффициентом, равным  $\mu$  (рис. 1).

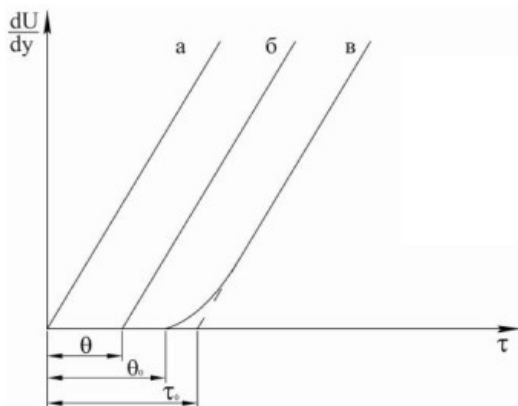


Рис. 1. Характеристики движения инъекционных растворов:  
 а – ньютоновская (бесструктурная) жидкость; б – пластичная жидкость (тело Бингама); в – вязко-пластичная жидкость (тело Бингама-Шведова)

Законы движения неоднородных дисперсных тампонажных растворов (глинистые и цементные растворы, т.к. глина и цемент – дисперсные фазы)

значительно отличаются от законов движения ньютоновских жидкостей. В спокойном состоянии под воздействием взаимодействия частиц дисперсной фазы между собой, а также с молекулами дисперсной среды в системе образуется структура, что внешне проявляется в загустевании раствора. Вследствие этого цементные растворы напоминают пластичные тела, которые обладают определенной упругой деформацией и занимают промежуточное положение между твердыми и жидкими телами.

Прочность структуры пластичных тел характеризуется величиной касательного напряжения, при котором тела выводятся из состояния равновесия и начинают двигаться. Эта величина называется статическим напряжением сдвига ( $\theta$ ). Такие жидкости подчиняются зависимости Бингама:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dU}{dy} + \theta, \quad (2)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение (напряжение сдвига), МПа;  $\eta$  – пластическая вязкость, Па\*с;  $\theta$  – статическое напряжение сдвига, МПа.

Характерным для таких систем является то, что они начинают течь лишь в случаях, когда градиенты напора превзойдут некоторую критическую величину, называемую начальным градиентом фильтрации и обусловленную предельным напряжением сдвига (рис. 1).

Для характеристики вязко-пластичных жидкостей (сюда относится глино-цементный тампонажный раствор) используется зависимость Бингама-Шведова (рис. 1):

$$\tau = \eta \cdot \frac{dU}{dy} + \tau_0, \quad (3)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение (напряжение сдвига), МПа;  $\eta$  – пластическая вязкость, Па\*с;  $\tau_0$  – динамическое напряжение сдвига, МПа.

При движении вязко-пластичного раствора полного разрушения его структуры не происходит (остается ядро потока в его центральной части). Это объясняется тем, что некоторая доля, образующих пространственную структуру раствора, успевает обратно восстановиться в потоке даже при очень больших скоростях течения.

Цементные инъекционные растворы со значительной долей твердой фазы ведут себя приблизительно в соответствии с теорией пластичного течения Бингама. Согласно этой теории, для того чтобы началось течение бингамовской жидкости, к ней должно быть приложено некоторое конечное усилие; при более высоких значениях приложенных усилий она будет течь, как ньютоновская жидкость. Поэтому график консистенции бингамовской

пластичной жидкости должен описываться двумя параметрами — предельным динамическим напряжением сдвига и пластической вязкостью.

Таким образом, основными реологическими свойствами, характеризующими течение цементных суспензий, являются пластическая вязкость, динамическое и статическое напряжение сдвига.

Пластическая вязкость — величина, характеризующая темп роста касательных напряжений сдвига при увеличении скорости сдвига в случае, когда зависимость касательного напряжения сдвига от градиента скорости сдвига представлена в виде прямой (не проходящей через начало координат), определяемая углом наклона этой прямой.

Динамическое напряжение сдвига — величина, косвенно характеризующая прочностное сопротивление инъекционного раствора течению.

Статическое напряжение сдвига — величина, характеризующая прочностное сопротивление инъекционного раствора, находящегося в покое заданное время, определяемая касательным напряжением сдвига, соответствующим началу разрушения его структуры.

Величина отношения динамического напряжения сдвига к пластической вязкости называется коэффициентом пластичности инъекционного раствора [6]:

$$K_{II} = \frac{\tau_0}{\eta}, \quad (4)$$

где  $K_{II}$  — коэффициент пластичности, 1/с;  $\eta$  — пластическая вязкость, Па\*с;  $\tau_0$  — динамическое напряжение сдвига, МПа.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что реологические свойства инъекционного раствора являются значимыми при расчете радиуса распространения раствора в грунте.

Наиболее точное теоретическое решение для определения радиуса распространения раствора при инъекционном закреплении грунтового массива под действием высоких давлений было получено в сферической системе координат [3]:

$$r = R \left( \frac{P}{k_1} \cdot \frac{3 - \sin \varphi_I}{\gamma_I \cdot H \cdot \sin \varphi_I + c_I \cdot \cos \varphi_I} \right)^{1/n} \quad (5)$$

где  $k_1$  и  $n$  — эмпирические коэффициенты;  $\varphi$  — угол внутреннего трения;  $c$  — удельное сцепление, кПа;  $P$  — давление нагнетания раствора, кПа;  $H$  — глубина погружения кондуктора в основание, м;  $R$  — приведенный радиус распространения раствора, м.

$$R = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot d^2 \cdot h}{16}} \quad (6)$$

где  $d$  – диаметр скважины, м;  $h$  – высота области, в которую нагнетается раствор, м.

Значения эмпирических коэффициентов:

- для глинистого грунта:  $n = (1,58 \pm 0,48) + (0,59 \pm 0,21) \cdot I_L$ ;  $k_I = 1,01 \pm 0,12$ ;  
 - для песчаного грунта:  $n = (3,61 \pm 1,08) + (1,64 \pm 0,57) \cdot e$ ;  $k_I = 1,02 \pm 0,08$ ,  
 где  $I_L$  – показатель консистенции;  $e$  – коэффициент пористости.

Основным преимуществом теоретического решения (5) является учет физических и механических характеристик грунта основания, а также основных технологических параметров: диаметра скважины, высоты зоны цементации, давления иньектирования.

С целью учета реологических свойств иньекционных растворов могут быть введены эмпирические коэффициенты, что позволит уточнить имеющееся выражение по определению радиуса иньектирования.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаскин Ю.Г. Укрепление грунтов иньектированием при ремонтнеавтомобильных дорог: Монография. / Бабаскин Ю.Г.; [под ред. И.И.Леоновича]. – Мн.: УП «Технопринт», 2002. – 177 с.
2. Вахрамеев И.И. Теоретические основы тампонажа горных пород / И.И. Вахрамеев. – М.: Недра, 1968. – 294 с.
3. Головки С.И. Теория и практика усиления грунтовых оснований методом высоконапорной иньекции [Текст]: Монография. / С.И. Головки. – Днепрпетровск: Пороги, 2010. – 247 с.
4. Луговской В.В. К вопросу теории цементации горных пород / В.В. Луговской // Изв. Вузов. Горный журнал. – М., 1959. – №8, – С. 13 – 21.
5. Маковой Н. Гидравлика бурения / Н. Маковой; [пер. с рум. В. И. Балабана]. – М.: Недра, 1986. – 536 с.
6. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам / Я.А. Рязанов. – Оренбург: Летопись, 2005. – 664 с.