

ФИЗИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСЕВШИХ ШЛАМОВ

Малеев В.Б., д.т.н., проф, Холоша А.С., асс,

Малеев А.В., инж, Удовенко С.А., асс.

Донецкий национальный технический университет

Исследованы физические и реологические свойства шламов в шахтных водосборных емкостях. Характерной особенностью таких осадков в насыщенном состоянии является их промежуточное состояние между аномальными (неньютоновыми) жидкостями и твердыми телами.

Physical and reologycal properties of muds in mine capacities are explored. In the saturated state their transient state between anomalous liquids and solids is the characteristic feature of such precipitations.

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Твердые частицы, оседаемые в предварительном отстойнике, водосборнике и приемном колодце насосов, относятся к связанным донным осадкам, которые в отличие от сыпучих не распадаются на составные части под действием гравитационных сил ни в воде, ни в воздухе. Характерной особенностью таких осадков в насыщенном состоянии является их промежуточное положение между аномальными (неньютоновыми) жидкостями и твердыми телами, а потому существует и некоторая неопределенность ряда физических свойств: связность между твердыми частицами в осадке, липкость осадка, склонность к кавитации и др.

Анализ исследований и публикаций. К сожалению нам не известны теоретические и экспериментальные работы по исследованию физических свойств шламов, оседаемых в шахтных водосборных емкостях.

Изложение материала и результаты. К факторам, обуславливающим свойства шламов следует отнести прежде всего крупность частиц, минералогический состав грунта, а также плотность, связность, размокаемость и пористость. Для более полной оценки реакции донного грунта на какое-либо воздействие водного потока следует отметить, что связные грунты при одинаковой влажности легче размываются при высокой пористости или при меньшей пластично-

сти (т.е. при уменьшении внутренних сил сцепления). При постоянной пористости и пластичности связные грунты легче размываются при увеличении влагонасыщения. Большое влияние на интенсивность размыва оказывает способность грунта под действием воды распадаться на отдельные частицы. Целью экспериментальных исследований шламов, осевших в предварительных отстойниках и приемных колодцах было получение основных физических и реологических свойств и зависимостей для донных осадков в области ламинарного течения и по виду этих параметров установить принадлежность осадков к классу неньютоновых жидкостей с тем, чтобы затем воспользоваться разработанным математическим аппаратом, описывающим движение соответствующей жидкости [1 - 6]. Экспериментальный материал был взят из отстойников и колодцев ш. Раздольная, им. Капустина и ш. Трудовская с глубины 0,5 м. от поверхности воды и 0,3 м от поверхности шлама. При этом плотность шлама в залежи составила $\rho_s = 1,28 \text{ т/м}^3$, а плотность осадка $\rho_m = 1,58 \text{ т/м}^3$, абсолютная влажность шлама в осадке $\epsilon = 0,667 = 66,7\%$, объемная концентрация $S = 0,487$, гранулометрический состав сухого осадка: $d = (0,25 \dots 0,5) \text{ мм} - 95\%$, $d = (0,0 \dots 0,25) \text{ мм} - 90,5\%$.

Зависимость разрежения (начало движения шлама в трубе) от глубины погружения среза h под уровень приведена на рис. 1. Обработка результатов эксперимента дала зависимость $P_g = 4,75 \cdot 10^4 \cdot h$

Как видно из этого уравнения, в реальных условиях шлам может засасываться в трубу всасывающего устройства насоса при погружении ее среза под уровень не более, чем на 1 м. При большем погружении будет происходить разрыв сплошности потока из-за кавитации.

Статическое Θ и динамическое τ_0 напряжения сдвига, структурная вязкость η , градиент скорости в зазоре $\gamma = \frac{dU}{dR}$ и касательное напряжение τ_R на радиусе R определялись по формулам [6]. Результаты экспериментов приведены на рис. 2 - 4.

Наибольшие значения γ и τ_0 имеют на R_B , а наименьшие — на R_H . А именно:

$$\gamma_B = \gamma_{max} = \frac{2 \cdot \omega \cdot R_H^2}{R_H^2 - R_B^2}, \quad \gamma_H = \gamma_{min} = \frac{2 \cdot \omega \cdot R_B^2}{R_H^2 - R_B^2}, \quad \frac{\gamma_{max}}{\gamma_{min}} = \left(\frac{R_H}{R_B}\right)^2, \quad \frac{\tau_{max}}{\tau_{min}} = \left(\frac{R_H}{R_B}\right)^2.$$

На графиках даны значения τ_0 и η отнесенные к внутреннему радиусу, так как момент сопротивления измерялся на вращающемся роторе, а эти параметры определяются уравнениями:

$$\tau_0 = \tau_{B,max} = \frac{M}{2\pi \cdot LR_B^2}, \quad \eta = \frac{M(R_H^2 - R_B^2)}{4\pi \cdot L \cdot \omega \cdot R_H^2 \cdot R_B^2}.$$

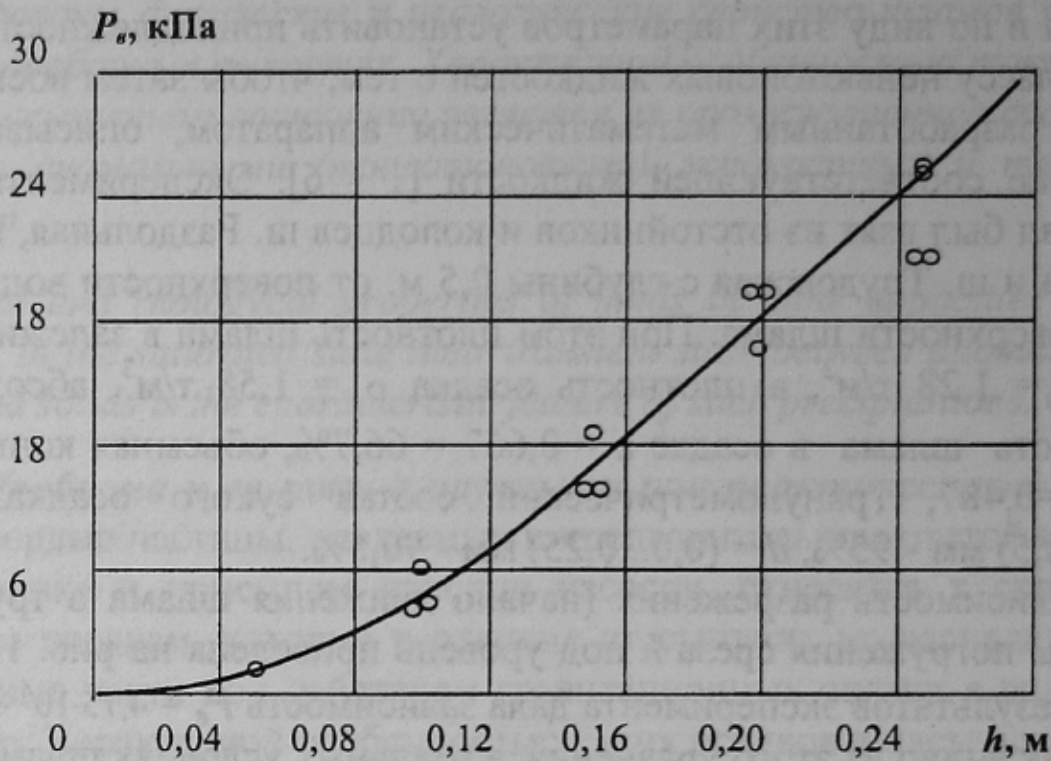


Рис. 1 – Зависимость разрежения в трубе (начало сдвига шлама с $S = 0,487$) от глубины погружения её среза под уровень шлама

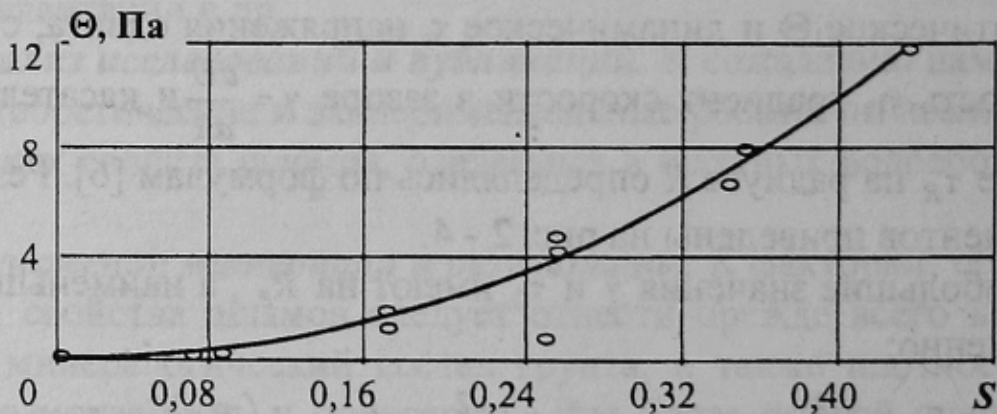


Рис. 2 – Зависимость статического напряжения сдвига от концентрации

В соответствии с последним уравнением значения τ_0 и η отнесены к ω , при которой измерялся момент M , т.е. к большим числам n . Значения градиента скорости γ даны предельные на обоих радиусах вискозиметра. Из рисунков 2 – 4 видно, что все зависимости описываются уравнениями второй степени. Однако характеристики $\tau_0 = f(S)$ и $\eta = f(S)$ при концентрации $S \approx 0,26$ резко изменяют степень кривизны. А именно, при малых концентрациях (обычный гидротранспорт) зависимости $\tau_0 = f(S)$ и $\eta = f(S)$ слабые, а затем при $S > 0,26$ наступает резкое увеличение этих зависимостей. Объясняется это изменением структуры гидросмеси, т.е. переходом из состояния шлама, образовавшегося в залежи, в состояние близкое к ньютоновым жидкостям, что характерно для большинства связных осадков.

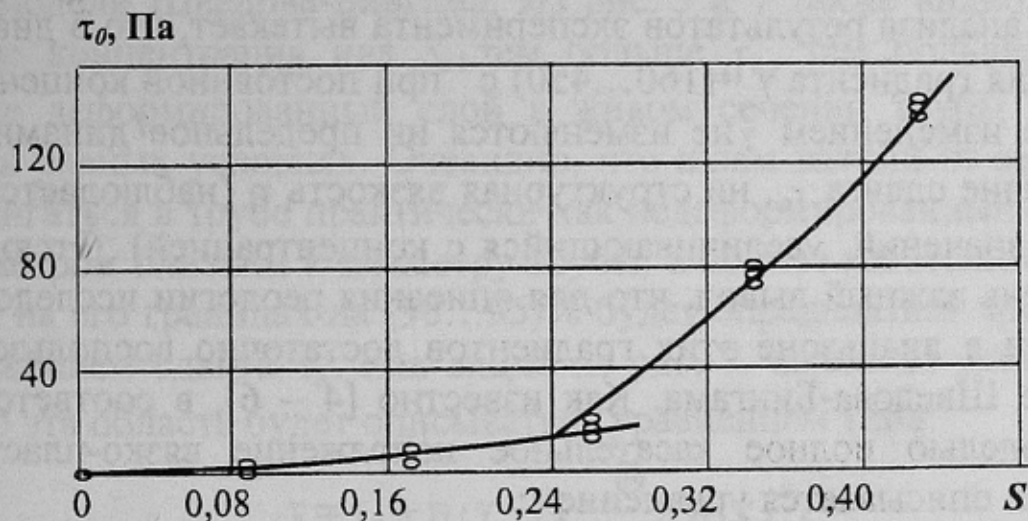


Рис. 3 – Зависимость предельного динамического напряжения сдвига от концентрации

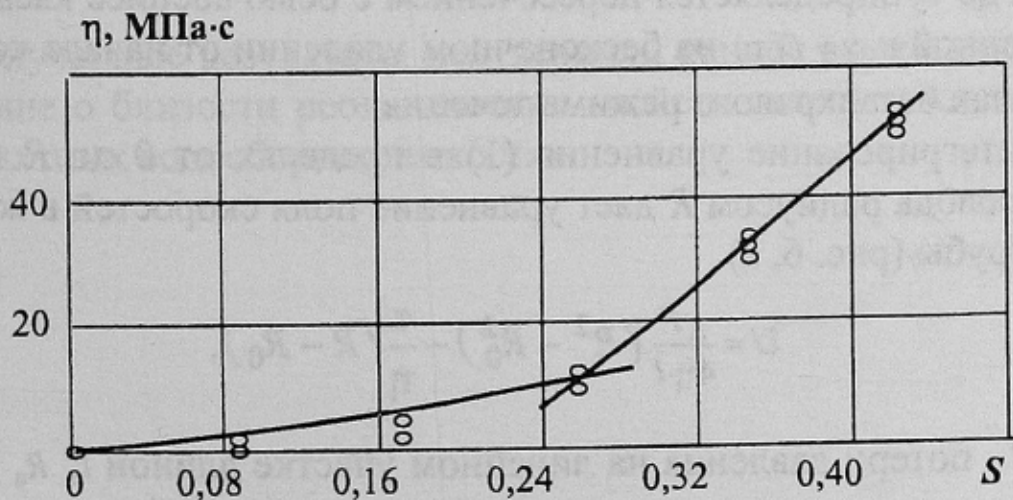


Рис. 4 – Зависимость структурной вязкости от концентрации

Из обзора литературных источников и полученного результата следует вывод, чем больше в шламе содержание органических веществ (меньше ρ_T) и чем однороднее и мельче он по гранулометрическому составу, тем меньше и при меньших концентрациях наблюдается этот перегиб, и наоборот, т.е. течение будет более плавным. Перечисленные характеристики описываются следующими эмпирическими уравнениями: статическое напряжение сдвига: $\Theta = 63 \cdot S^2$, динамическое напряжение сдвига в диапазоне концентраций $S = (0,0 \dots 0,26)$: $\tau_0 = 186 \cdot S^2$, то же в диапазоне $S = (0,26 \dots 0,44)$: $\tau_0 = (10^3 \cdot S^2 - 45)$, структурная вязкость в диапазоне $S = (0,0 \dots 0,26)$: $\eta = (0,14 \cdot S^2 + 0,001)$, то же в диапазоне $S = (0,26 \dots 0,44)$: $\eta = (0,285 \cdot S^2 - 0,004)$.

Из анализа результатов эксперимента вытекает, что в диапазоне изменения градиента $\gamma = (160 \dots 450) \text{ с}^{-1}$ при постоянной концентрации шлама с изменением γ не изменяются ни предельное динамическое напряжение сдвига τ_0 , ни структурная вязкость η (наблюдается лишь разброс значений, увеличивающийся с концентрацией). Отсюда следует очень важный вывод, что для описания реологии исследованного шлама в диапазоне этих градиентов достаточно воспользоваться моделью Шведова-Бингама. Как известно [4 – 6], в соответствии с этой моделью полное касательное напряжение вязко-пластичной жидкости описывается уравнением:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma. \quad (1)$$

Общий вид реологической характеристики $\gamma = f(\tau)$ приведен на рис. 5, где τ_0 определяется пересечением с осью абсцисс касательной, проведенной к $\gamma = f(\tau)$ на бесконечном удалении от начала координат в пределах безвихревого режима течения.

Интегрирование уравнения (1) в пределах от 0 до R в потоке трубопровода радиусом R дает уравнение поля скоростей в живом сечении трубы (рис. 6, а)

$$U = \frac{\Delta P}{4\eta \cdot l} (R^2 - R_0^2) - \frac{\tau}{\eta} (R - R_0), \quad (2)$$

где ΔP - потери давления на линейном участке длиной l ; R_0 - радиус цилиндра шлама перемещающегося в трубе как недеформированное твердое тело с постоянной скоростью U_0 .

Из уравнения (2) непосредственно вытекает, что в участке потока с деформированным полем скоростей между радиусами R и R_0 градиент поля скоростей изменяется по линейному закону от максимума на стенке до нуля на радиусе R_0 (рис. 6, б), а полное касательное напряжение по тому же закону в тех же пределах от максимума до τ_0 (рис. 6, в).

На рис. 7 реологическая кривая $\gamma = f(\tau)$ при $S = 0,259$ приведена дважды (и на рис. 7,а и на рис. 7,б) для удобства сопоставления между собой характеристик с малой и большой концентрацией шлама. Неисследованные участки кривых показаны штриховыми линиями как предположительные. Сопоставляя рис. 5 и 7, видно, что при $\gamma > 160 \text{ с}^{-1}$ экспериментальные характеристики полностью соответствуют модели Шведова-Бингама. Из рис. 5 и 7 также видно, что чем больше концентрация ила S , тем больше τ_0 , тем больше R_0 , тем тоньше деформированный слой в живом сечении трубы при всех прочих равных условиях. Очевидно, что шлам взятый из залежи будет двигаться в трубе практически как недеформированный стержень с диаметром близким к диаметру трубы, а полное касательное напряжение на его границах на (90...95)% будет определяться предельным напряжением сдвига τ_0 . Как видно из рис. 7, наиболее удовлетворительно эта область будет описываться уравнением типа:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma - \left(1 - \frac{\tau_0}{\eta \cdot \gamma}\right) (\eta \cdot \gamma)^n, \quad (3)$$

где n - показатель степени, зависящий от концентрации S и состава ила.

Полученные результаты подтвердили ранее высказанное предположение о близости реологических свойств вязких донных осадков в шахтных водосборных емкостях.

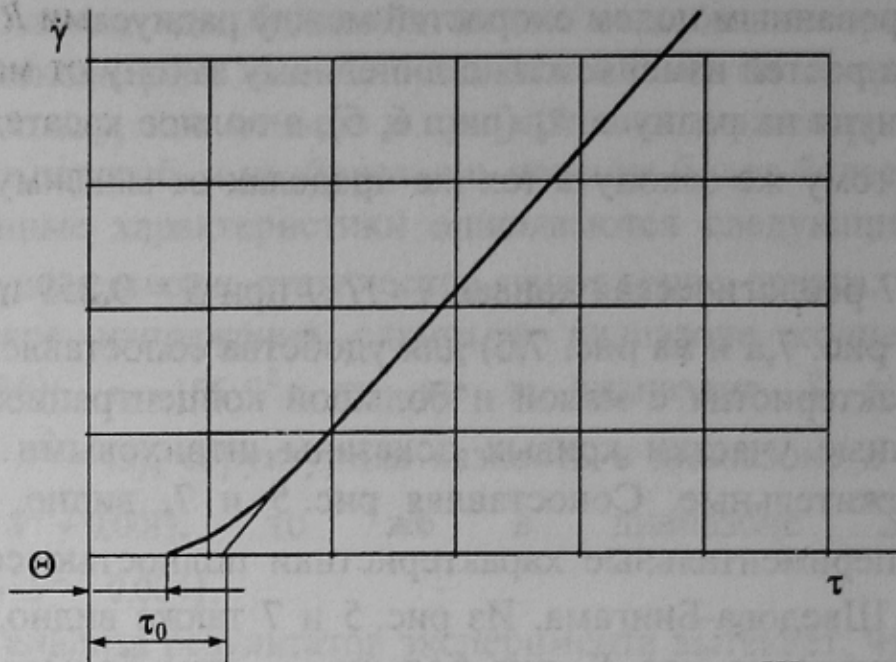


Рис. 5 – Общий вид реологической характеристики по Шведову-Бингаму

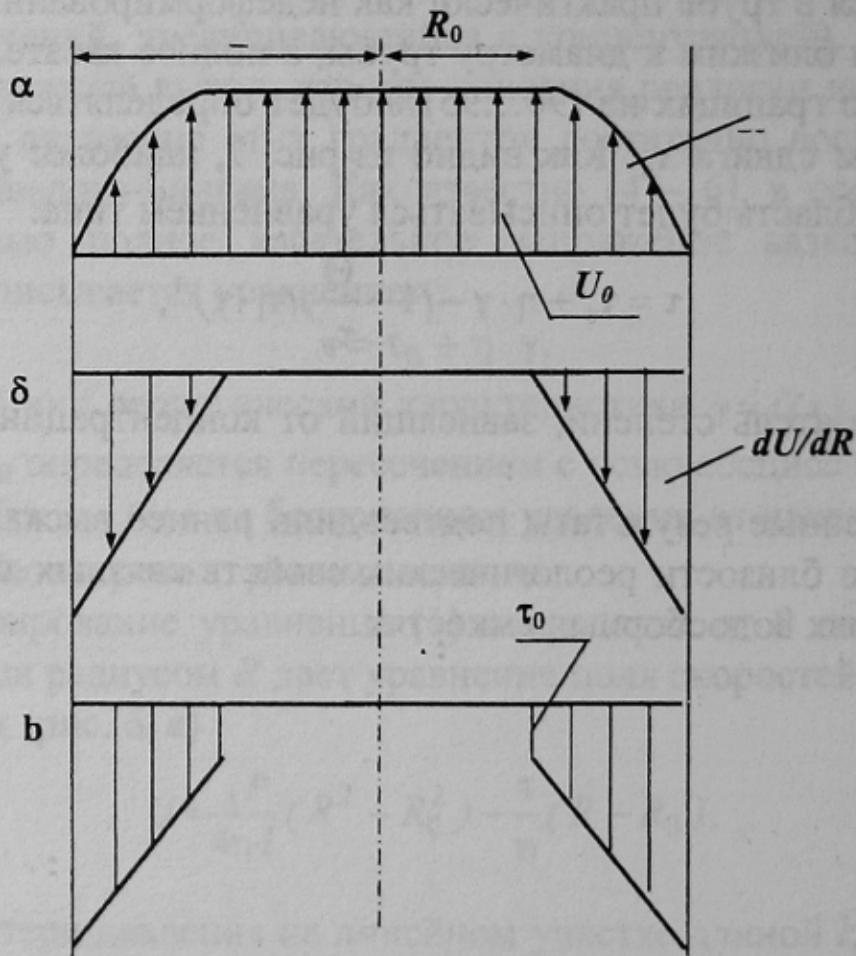


Рис. 6 – Поля скоростей градиента скорости и касательных напряжений в напорном потоке

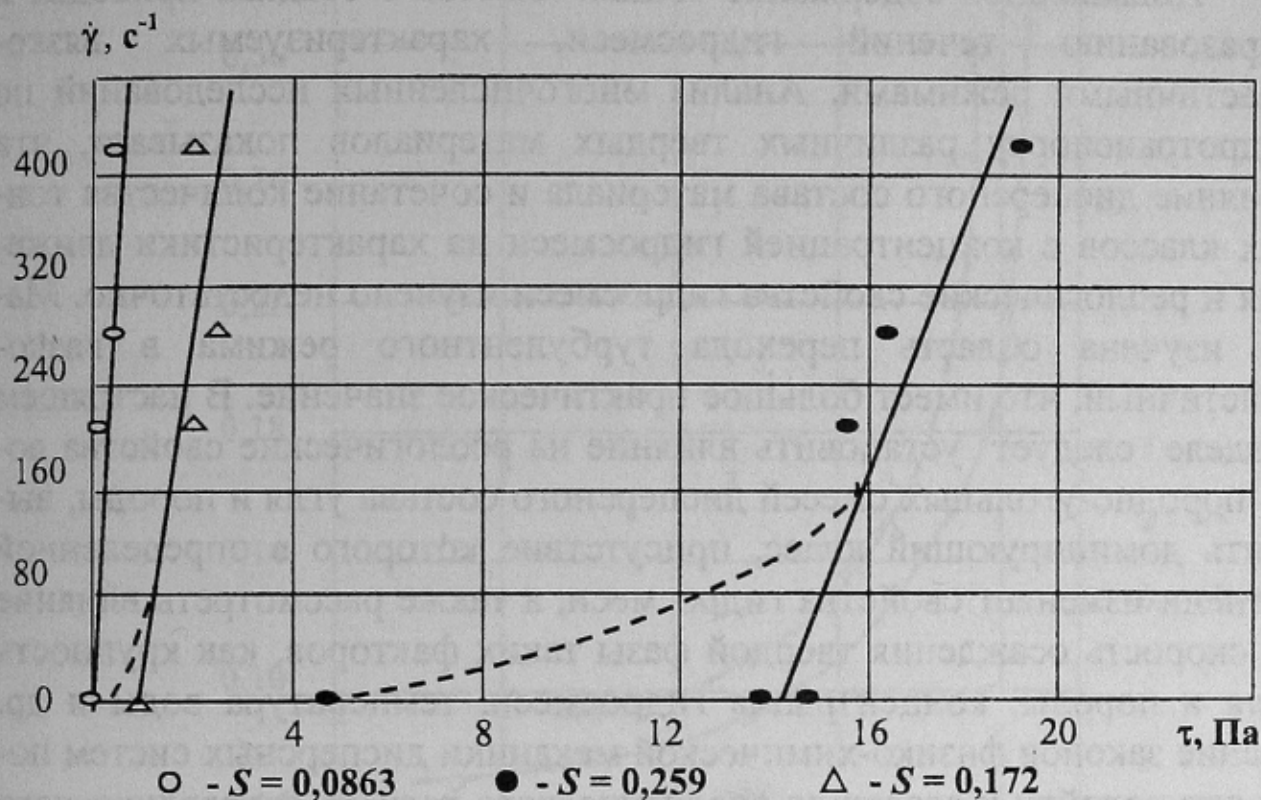


Рис. 7,а – Реологические кривые шлама при различных концентрациях S

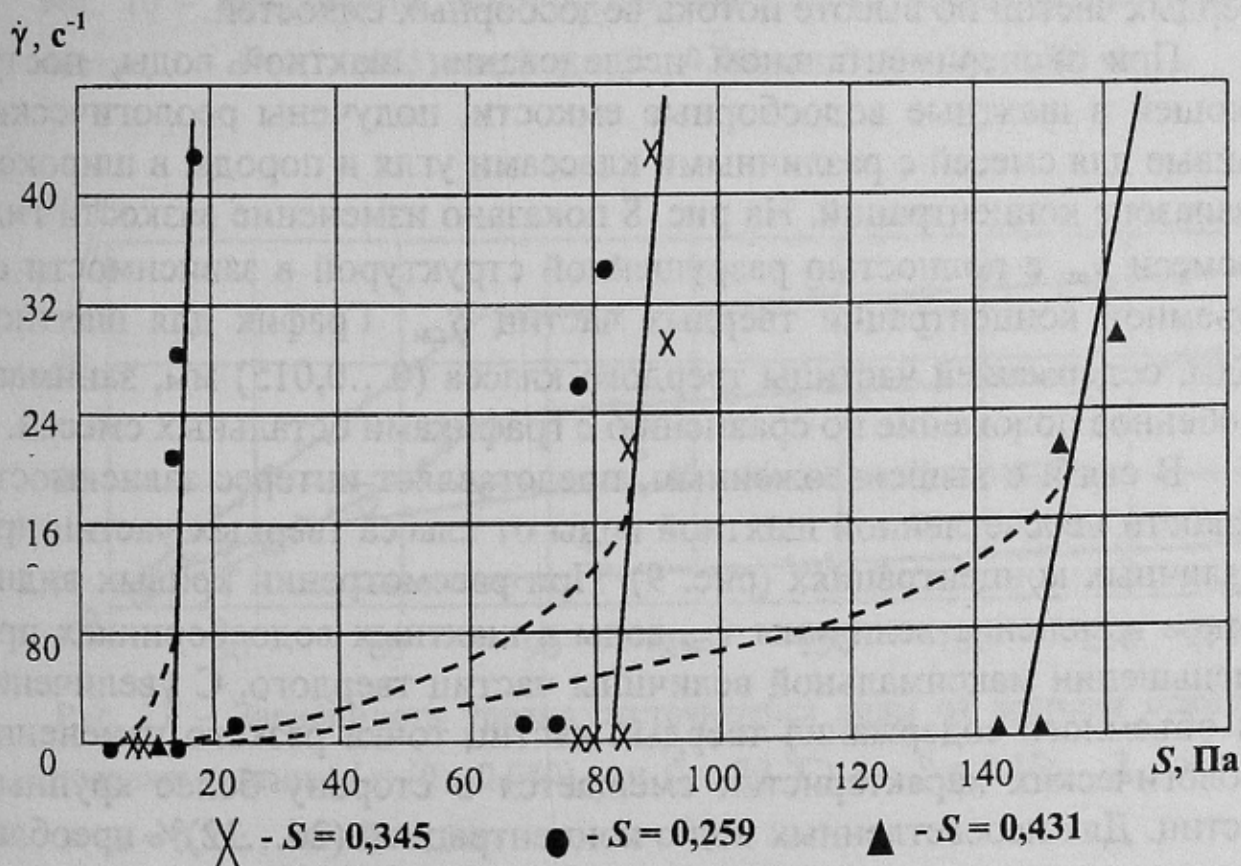


Рис. 7, б – Реологические кривые шлама при различных концентрациях S

Повышенное содержание тонких классов в осадках приводит к образованию течений гидросмеси, характеризующихся вязкопластичными режимами. Анализ многочисленных исследований по гидротранспорту различных твердых материалов показывает, что влияние дисперсного состава материала и сочетание количества тонких классов с концентрацией гидросмеси на характеристики движения и реологические свойства гидросмеси изучено недостаточно. Мало изучена область перехода турбулентного режима в вязкопластичный, что имеет большое практическое значение. В настоящем разделе следует установить влияние на реологические свойства водо-породно-угольных смесей дисперсного состава угля и породы, выявить доминирующий класс, присутствие которого в определенной степени изменяет свойства гидросмеси, а также рассмотреть влияние на скорость осаждения твердой фазы таких факторов, как крупность угля и породы, концентрация гидросмеси, температура воды и др. Знание законов физико-химической механики дисперсных систем позволит подойти к созданию аналитического расчета гидравлического транспортирования твердых материалов шахтной водой и правильно определить время осаждения и перераспределения различных классов твердых частиц по высоте потока водосборных емкостей.

При экспериментальном исследовании шахтной воды, поступающей в шахтные водосборные емкости, получены реологические кривые для смесей с различными классами угля и породы в широком диапазоне концентраций. На рис. 8 показано изменение вязкости гидросмеси $\nu_{см}$ с полностью разрушенной структурой в зависимости от объемной концентрации твердых частиц $S_{см}$. График для шахтной воды, содержащей частицы твердого класса (0...0,015) мм, занимает особенное положение по сравнению с графиками остальных смесей.

В связи с вышеизложенным, представляет интерес зависимость вязкости неосветленной шахтной воды от класса твердых частиц при различных концентрациях (рис. 9). При рассмотрении кривых видно резкое изменение величины $\nu_{см}$ воды в шахтных водосборниках при уменьшении максимальной величины частиц твердого. С увеличением объемного содержания твердых частиц точка резкого изменения реологических характеристик смещается в сторону более крупных частиц. Для неосветленных вод с концентрацией (26...32)% преобладающее влияние на вязкость и напряжение сдвига оказывают частицы размером менее 40 мк. При тех же концентрациях присутствие более

крупных частиц на реологические свойства шахтной воды практически не влияет. При увеличении концентрации величина размера частиц, оказывающих преобладающее влияние на реологические характеристики шахтной воды, возрастает. Зависимость вязкости шахтной воды, содержащей классы твердых частиц (0...0,065); (0...0,2) и (0...0,5) мм с одинаковым процентным содержанием частиц класса (0...0,04) мм приведены на рис. 10. Как видно из графиков, кривые практически совпадают при размерах частиц (0...0,065) и (0...0,2) мм и имеют зону критических концентраций, проходящую до (35...36)%, а при частицах (0...0,5) мм – $S = (37...38)\%$. Таким образом, при сравнительно большом изменении состава твердых частиц от (0...0,065) до (0...0,5) мм свойства шахтной воды меняются незначительно.

На рис. 11 представлены кривые отстаивания шахтной воды в водосборных емкостях с частицами класса (0...0,04) мм. Наиболее интенсивно расслоение происходит в течение первых (1...1,5) часов, затем скорость расслаивания резко замедляется. Опыты показали, что с увеличением объемного содержания твердых частиц скорость расслаивания изменяется весьма неравномерно и при достижении некоторой концентрации резко уменьшается. Концентрации, при которых происходит резкое замедление скорости осаждения, соответствует местам перегиба кривых $H=f(T)$. Исследования влияния температуры шахтной воды на скорость осаждения показали, что при достижении концентрации порядка 30% по объёму скорость расслаивания при разных температурах выравнивается. Что очень важно при отстаивании воды в шламосборных камерах.

Исследования шахтной воды, поступающей в водосборные емкости, показали: воды с частицами твердого класса (0...0,07) мм при объемных концентрациях выше 15% обладают аномальными свойствами, характерными для неньютоновых жидкостей; имеется область критических концентраций, при достижении которой значение вязкости и напряжения сдвига шахтной воды резко увеличивается; критическая область для более тонких классов твердых частиц соответствует меньшим значениям концентрации; физико-механические свойства воды зависят от крупности частиц твердой фазы, наибольшее влияние оказывают частицы, не превышающие по крупности 70 мк, добавление более крупных частиц не вызывает существенного изменения реологических свойств жидкости; на свойства шахтной

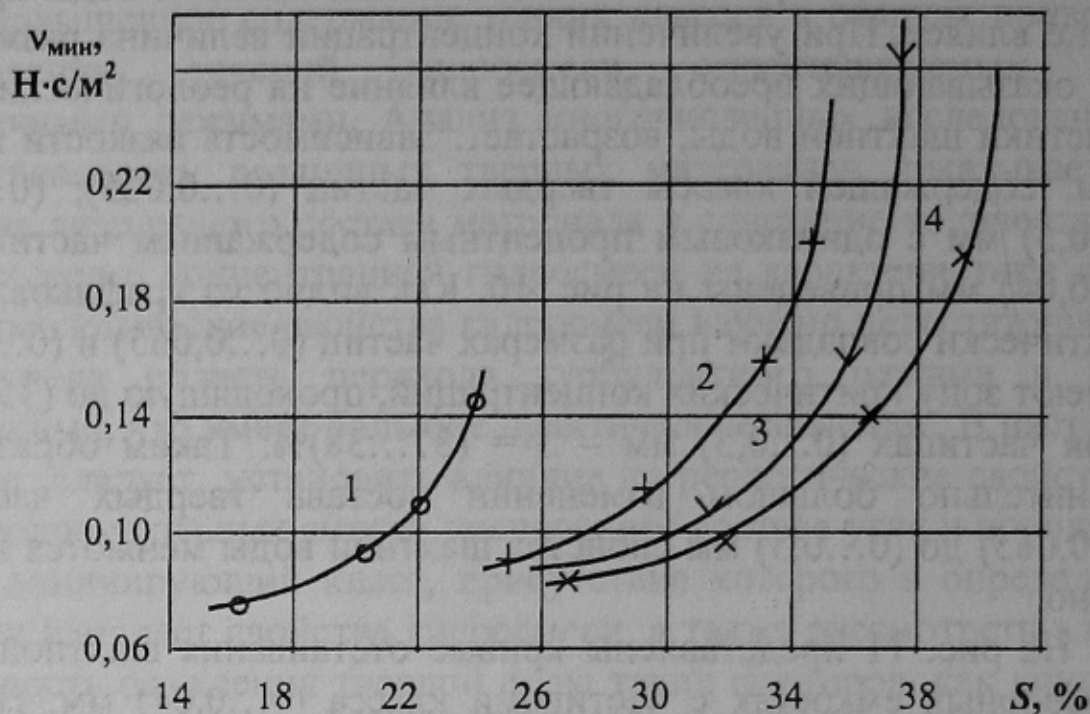


Рис. 8 – Зависимость вязкости шахтной воды от концентрации твердых частиц при их различных размерах: 1 – $d = (0 \dots 0,015)$; 2 – $d = (0 \dots 0,04)$; 3 – $d = (0 \dots 0,065)$; 4 – $d = (0 \dots 0,085)$ мм

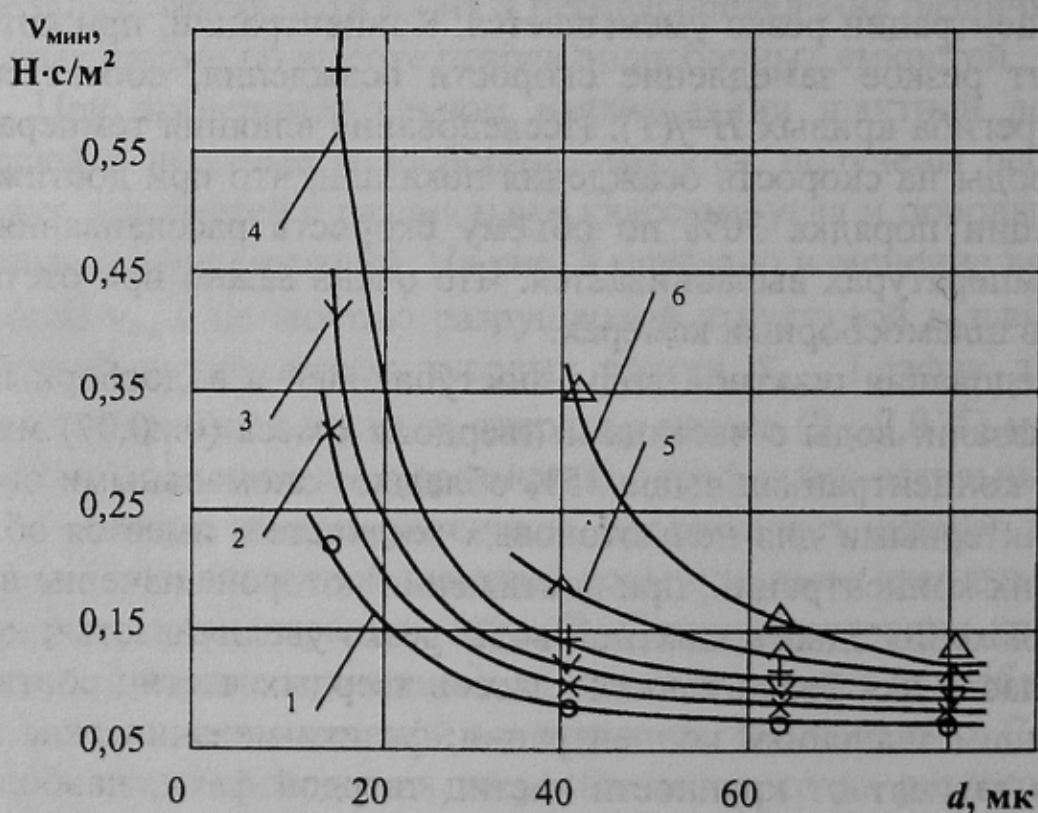


Рис. 9 – Зависимость вязкости неосветленной шахты от крупности частиц: 1 – $S = 0,26$; 2 – $S = 0,28$; 3 – $S = 0,30$; 4 – $S = 0,32$; 5 – $S = 0,34$; 6 – $S = 0,36$

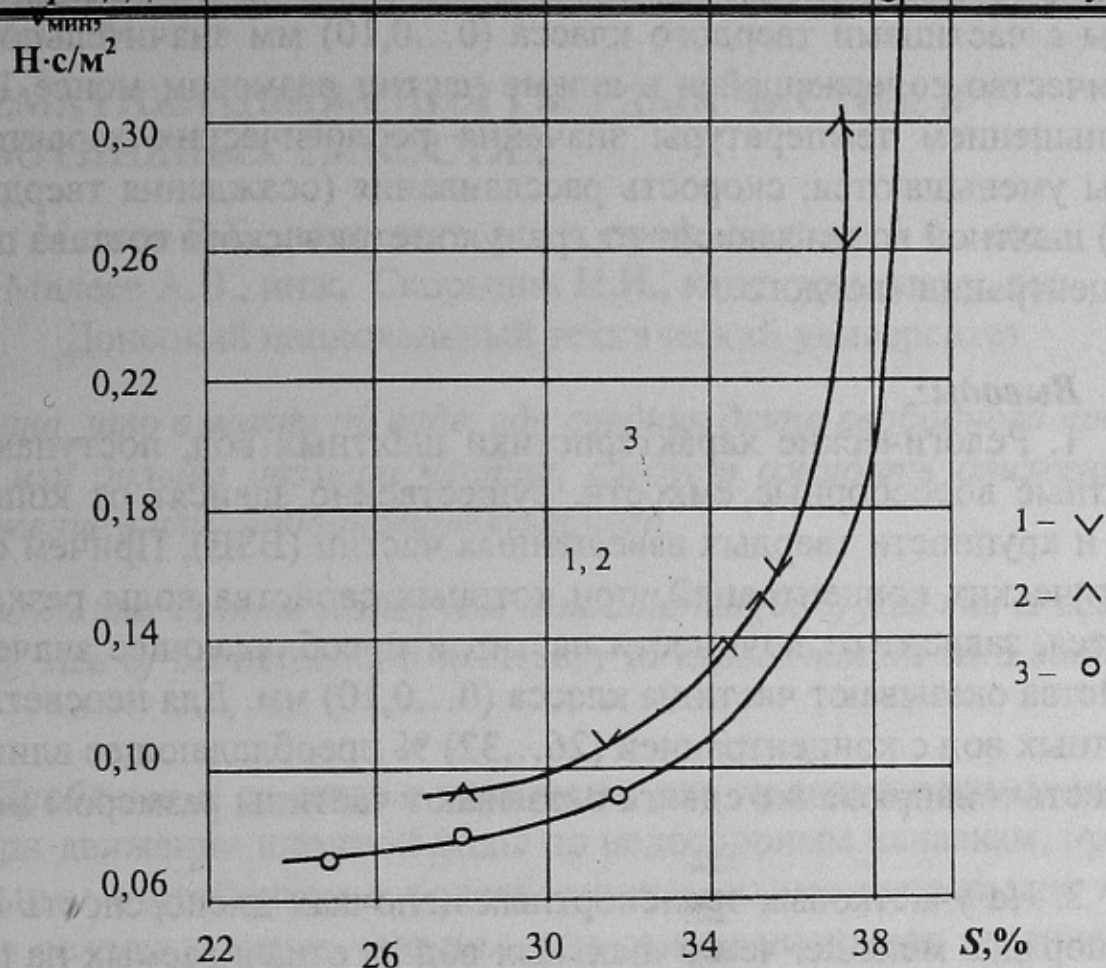


Рис. 10 – Зависимости вязкости шахтной воды от концентрации твердых частиц: 1 – $d=(0...0,065)$ мм; 2 – $d=(0...0,20)$ мм; 3 – $d=(0...0,50)$ мм.

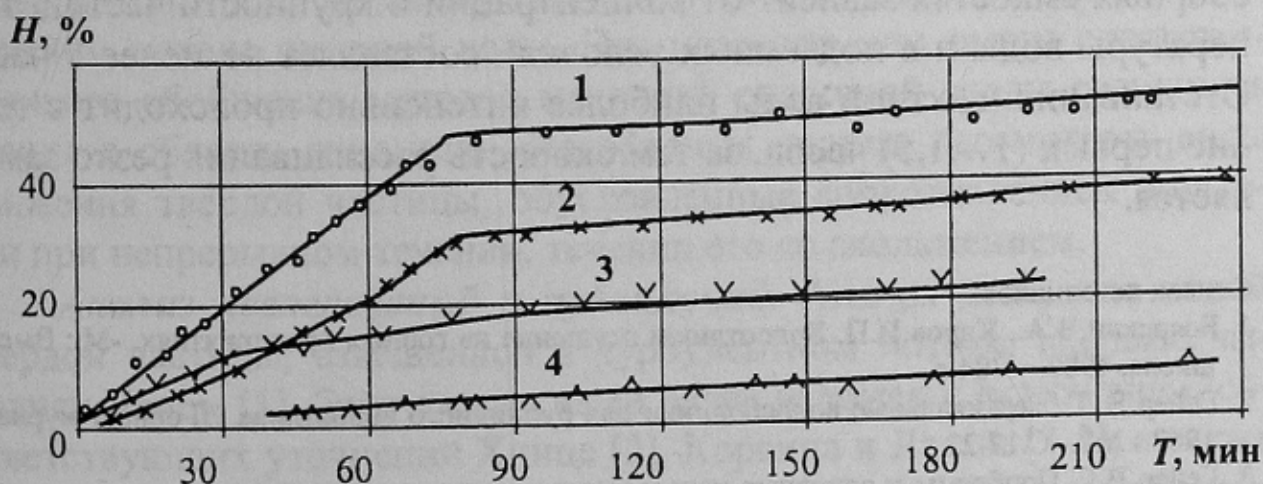


Рис. 11 – Зависимость уровня отстоявшейся воды от времени осаждения твердых частиц ($d=(0...0,040)$ мм; $t^0=20$ °C) 1 – $S=0,15$; 2 – $S=0,20$; 3 – $S=0,25$; 4 – $S=0,30$

воды с частицами твердого класса (0...0,10) мм значительно влияет количество содержащейся в шламе частиц размером менее 15 мк; с уменьшением температуры значения реологических характеристик воды уменьшаются; скорость расслаивания (осаждения твердых частиц) шахтной во ды зависит от гранулометрического состава шлама и концентрации твердого.

Выводы:

1. Реологические характеристики шахтных вод, поступающих в шахтные водосборные емкости, существенно зависят от концентрации и крупности твердых взвешенных частиц (ВЗВ). Причем область критических концентраций, при которых свойства воды резко изменяются, зависит от крупности частиц и преобладающее значение на свойства оказывают частицы класса (0...0,10) мм. Для неосветленных шахтных вод с концентрацией (26...32) % преобладающее влияние на вязкость и напряжение сдвига оказывают частицы размером менее 40 мк.

2. На участках транспортных цепочках дисперсность ВЗВ на два порядка меньше, чем в шахтных водах, откачиваемых на поверхность. Следовательно, целесообразно не допускать разрушения крупных частиц, улавливая их в непосредственной близости у источниках загрязнения.

3. Скорость осаждения твердых частиц при отстаивании в водосборных емкостях зависит от концентрации и крупности частиц, температуры воды и в подземных условиях составляет не менее 8 часов. Отстаивание шахтной воды наиболее интенсивно происходит в течение первых (1...1,5) часов, за тем скорость расслаивания резко замедляется.

Список источников:

1. Боярский В.А., Киров И.П. Водоотлив и осушение на горных предприятиях. -М.: Высшая школа, 1980. - 304 с.
2. Гейер В. Г. Вертикальные водосборники для рудничного водоотлива. //Горный журнал. - 1962.- №2.- С.17-23.
3. Гейер В.Г. Проблемы и основные направления в организации водоотлива глубоких горизонтов угольных шахт. / В кн.: Водоотлив глубоких шахт. -М.:Недра, 1967.- С.3 - 9.
4. Малеев В.Б. Анализ способов очистки водосборников главного водоотлива, // Разработка месторождений полезных ископаемых. -К.: Техника. - 1974. -Вып.37- С. 69-71.
5. Уилкинсон У.Л. Неньютоновыи жидкости. -М.: Мир, 1964. - 216с.
6. Шишченко Р.И., Есьман Б.И., Кондратенко П.И. Гидравлика промывочных жидкостей.- М.: Недрa, 1976. - 394с.