

**В. А. Морозов**, канд. техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94) (e-mail: vamorozov46@list.ru)

**А. В. Морозов**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94) (e-mail: bumer777@list.ru)

**Е. Н. Морозова**, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94) (e-mail: bumer777@km.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

Одной из проблем перекачки осадков сточных вод (ОСВ) является использование центробежных насосов для этих целей. В настоящее время используются объёмные насосы, в частности винтовые. Применение центробежных насосов ограничено из-за отсутствия реологических характеристик перекачиваемых сред, в связи с чем центробежные насосы применяют в основном после разбавления ОСВ водой, что приводит к дополнительным затратам энергии.

Определение реологических характеристик ОСВ позволит рекомендовать центробежные насосы для их перекачки и установить их возможности.

С этой целью предлагается использовать метод капиллярной вискозиметрии для определения реологических констант (предельное напряжение сдвига и вязкость), которыми характеризуются ОСВ, течение которых описывается моделью вязкопластичной жидкости.

Определение реологических констант осадков сточных вод проводилось на производственной установке, где снимались рабочие характеристики насосов с одновременным определением вязкопластичных свойств ОСВ.

Реологические константы ОСВ определялись методом учёта гидравлических сопротивлений на фиксированном участке круглой трубы в зависимости от расхода ОСВ и его концентрации в предположении, что режим течения ламинарный.

Установлено, что в отличие от ньютоновских жидкостей все кривые течения в трубе в зависимости от его концентрации проходят не через начало координат, а отсекают отрезок, что указывает на вязкопластичные свойства ОСВ. Движение начинает происходить лишь после того, когда давление в трубе будет больше давления предельного напряжения сдвига.

Исследование реологических свойств ОСВ показало, что основными характеристиками исследуемых ОСВ являются предельное напряжение сдвига и пластическая вязкость, которые зависят от концентрации суспензии.

Результаты эксперимента показывают, что изменение реологических характеристик ОСВ в зависимости от концентрации зависит от изменения характеристик насосов и соответствует существующим рекомендациям по перекачке ОСВ насосами без разбавления водой.

Установлена зависимость между реологическими характеристиками осадков сточных вод и их концентрацией.

**Ключевые слова:** осадки сточных вод; реологические характеристики; насосы; вискозиметрия; гидравлические потери; вязкость.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-5-66-72

**Ссылка для цитирования:** Морозов В. А., Морозов А. В., Морозова Е. Н. Исследование реологических характеристик осадков сточных вод // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 5(80). С. 66-72.

\*\*\*

Перекачка ОСВ получает все большее распространение в связи с механизацией и автоматизацией различных технологических процессов. Транспортирование ОСВ, обладающих пределом текучести, при помощи насосов имеет большие преимущества перед другими видами

транспорта: непрерывность работы, возможность применения высокой степени автоматизации работы, низкие капитальные затраты при транспортировании больших количеств материалов, простота установки, независимость от неблагоприятных условий.

Особенностью работы насосов при перекачке таких сред является то, что характеристики насосов зависят от реологических свойств данных сред. Однако выбор насоса для транспортирования ОСВ делается чаще всего без учета реологических особенностей перекачиваемых сред, что приводит к неоправданным затратам энергии или неудовлетворительной работе установок. Концентрация, размер твердой фракции, вязкость дисперсионной среды и другие факторы, от которых зависят реологические свойства ОСВ, влияют на характеристики насосов.

Течение ОСВ описывается моделью вязкопластичной жидкости, которая характеризуется двумя реологическими константами: предельным напряжением сдвига и вязкостью.

На величину предельного напряжения сдвига значительное влияние оказывает шероховатость поверхности, размеры прибора, скорость наложения деформации. Наиболее правильным следует считать определение реологических констант жидкости по реологической кривой течения.

В связи со сложностью реологического поведения ОСВ, для определения реологических характеристик были использованы два метода определения реологических констант методом Стокса и методом анализа потерь напора на фиксированном участке цилиндрической трубы. При помощи этих методов оценивалось реологическое поведение ОСВ в области как малых градиентов скоростей, так и больших.

Для определения реологических характеристик ОСВ по методу Стокса применялся модернизированный реовискозиметр Хеплера, который имеет широкий диапазон измерения свойств течения раз-

личных систем. Данным прибором можно определять реологические свойства и получить форму кривой течения.

Принцип действия прибора основан на движении шарика, коаксиально введенного с помощью рабочего стержня внутри ОСВ, заполняющего неподвижный цилиндр. Шарик при этом ламинарно обтекается в концентрическом зазоре между шариком и цилиндром.

Исследование реологических характеристик в области малых и весьма малых градиентов скоростей сдвига на реовискозиметре Хеплера показало, что при указанных скоростях сдвига наблюдаются два режима течения: шведовский, или режим с практически не разрушенной структурой, и режим вязкопластичного течения или бингамовский, характеризующийся наличием предельного напряжения сдвига с пластической вязкостью.

В связи с чем использование метода Стокса для определения реологических характеристик ОСВ при работе в гидротранспортных системах неприемлемо, так как скорости в вискозиметре и системах перекачки не соответствуют друг другу. Таким образом метод Стокса можно применять для расчёта течений в области малых и весьма малых скоростей потока.

Определение реологических характеристик ОСВ методом анализа потерь напора в трубопроводе производилось на трубопроводе Ø 125 мм. Важным преимуществом данного метода является то, что размер частиц ОСВ не оказывает влияния на измерение, а фиксированный участок трубопровода является вискозиметром.

Исследование реологических свойств различных систем [1,2,3,4,11] методом анализа потерь показало, что для различ-

ных дисперсных систем этот метод является предпочтительным. Для определения реологических характеристик ОСВ была смонтирована установка [4], позволяющая производить исследование реологических характеристик ОСВ в промышленных условиях.

Методика проведения эксперимента заключалась в измерении соответствующих друг другу значений расходов ОСВ и потерь напора в трубе при изотермическом режиме течения.

Если зависимость потерь напора от расхода в широком диапазоне представляет собой прямую линию, аппроксимация которой отсекает на оси координат потерь напора определенную величину, то такое течение будет структурно-ламинарным. При таком течении существует две зоны: сдвиговое градиентное течение между стенками и ядром потока и безградиентное стержневое течение [5,6], поперечные размеры которого зависят от направлений и скоростей сдвига.

Напряжение сдвига и градиент скорости по данным анализа потерь напора в трубе определялись в соответствии с уравнением Букингема-Рейнера.

Для определения реологических констант необходимо определить перепад давления и расход. Расход определяли по показаниям электромагнитного расходомера, перепад давления – по показаниям дифференциального микроманометра.

Тангенс угла наклона прямого участка кривой течения определяет пластическую (динамическую) вязкость, а значение предельного напряжения сдвига будет равно  $\frac{3}{4}$  длины отрезка от точки пересечения прямой течения до начала координат.

В общем случае, когда известна зависимость потерь напора от расхода жидкости, реологические константы вязкопластичной жидкости можно определять по двум точкам, не прибегая к построению реологической кривой течения. В таком случае в уравнение Букингема-Рейнера подставляем значения двух последовательных замеров потерь напора на разных расходах и легко определяем реологические константы. Данный метод определения реологических констант широко применяется для многих растворов, суспензий, смесей, различных масс и других дисперсных систем.

На рис. 1 представлена реограмма течения ОСВ, полученная по потерям напора ОСВ от расхода в трубе Ø 125 мм.

Реограмма течения ОСВ в трубе показывает, что при градиентах скоростей от 50 до 500 кривые течения достаточно удовлетворительно описываются линейной зависимостью, что находится в пределах скоростей транспортирования. Из реограммы видно, что в области исследуемых градиентов давлений и скоростей существует линейная зависимость реологической кривой течения, что говорит о применимости модели линейной вязкопластичной жидкости Шведова–Бингама.

На рис.2 представлена зависимость предельного сопротивления сдвига от концентрации ОСВ, откуда следует, что предел текучести начинается с 2% концентрации.

На рис.3 показана зависимость вязкости от концентрации ОСВ. Как следует из рис.2 и 3 в пределах транспортирования ОСВ до концентрации 5% вязкость не превышает 2 пуаз, что соответствует рекомендациям по применению центробежных насосов [4, 10].

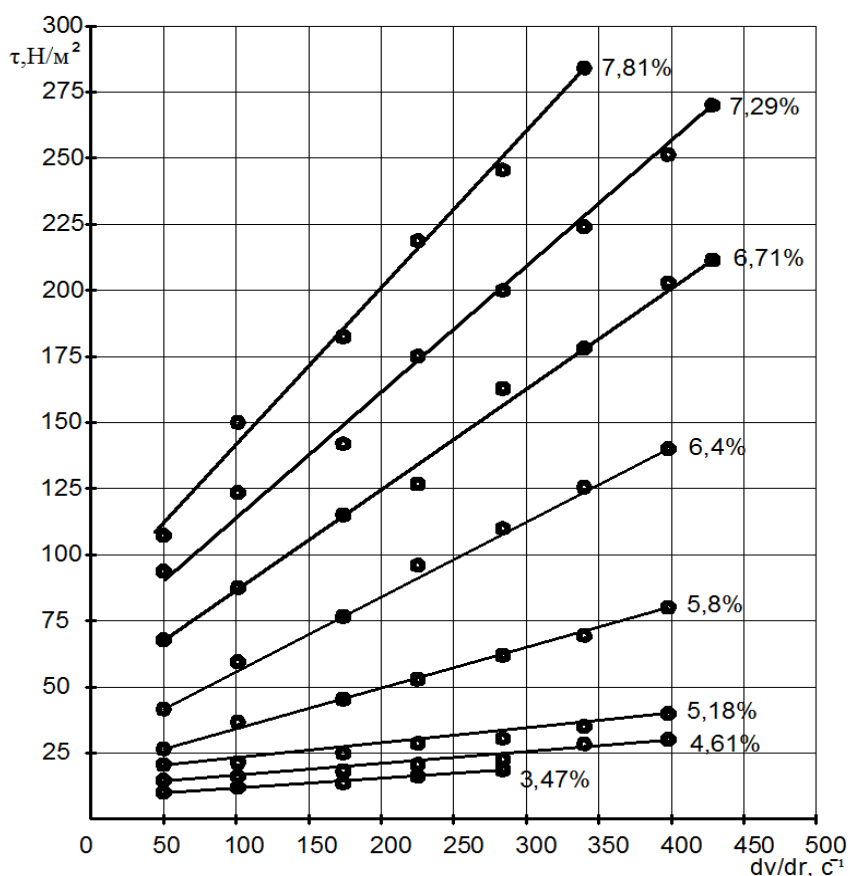


Рис. 1. Реограмма течения ОСВ в круглой трубе в зависимости от его концентрации

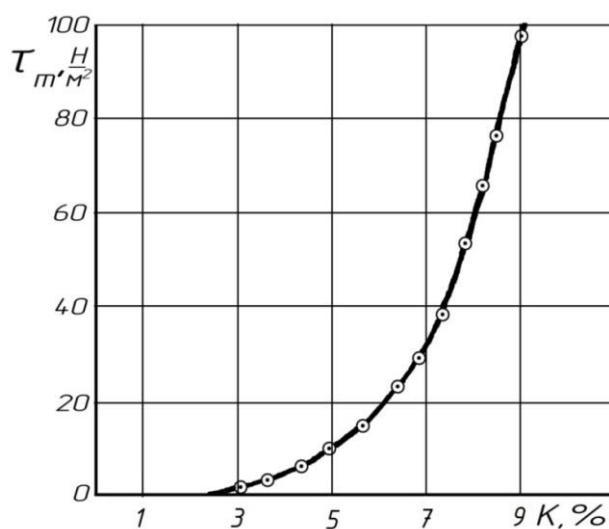


Рис. 2. Зависимость предельного сопротивления сдвига от концентрации ОСВ

Известно, что при малых концентрациях ОСВ вязкость не зависит от скорости движения [8,9,10] и является постоянной величиной. Под действием сил, превышающих предельное напряжение

сдвига, ОСВ высоких концентраций начинают течь, при этом каждой скорости соответствует определенная степень разрушения структуры [5, 6, 7].

Из реограммы течения видно, что в широком диапазоне изменения расхода ОСВ различной концентрации потери

напора описываются линейной зависимостью, что говорит о структурно-ламинарном режиме течения.

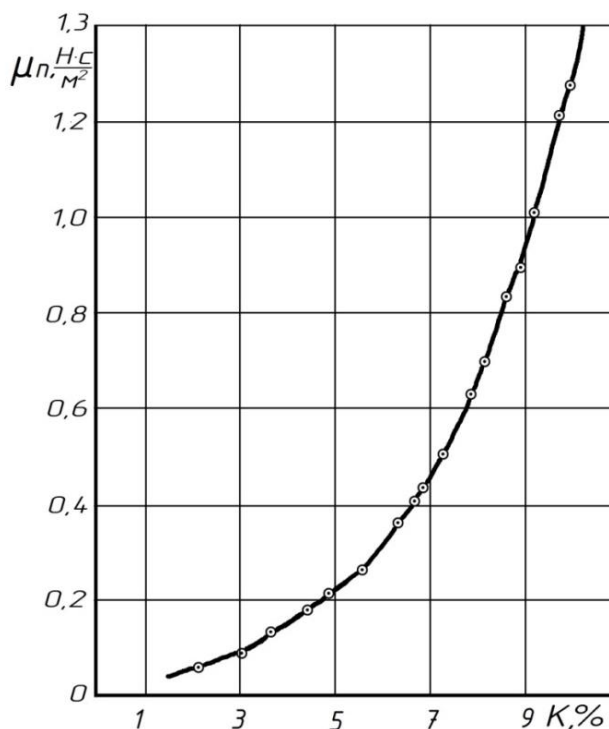


Рис. 3. Зависимость вязкости от концентрации ОСВ

Из рис. 2 видно, что с увеличением концентрации до 2% ОСВ не обладает пределом текучести, а вязкость (см. рис.3) монотонно увеличивается. Следует отметить, что сточная жидкость обычно характеризуется концентрацией до 1%, дальнейшее увеличение концентрации характерно для ОСВ.

Сопоставляя характеристики насосов на ОСВ [4,7] и реологические характеристики ОСВ можно сделать вывод о том, что характеристики насосов и вязкопластичные свойства ОСВ начинают изменяться с концентрации 1%.

## Выводы

1. В отличие от ньютоновских жидкостей все кривые течения ОСВ в трубе в зависимости от его концентрации проходят не через начало координат, а отсека-

ют отрезок, что указывает на вязкопластичные свойства ОСВ. Движение начинается происходить лишь после того, когда давление в трубе больше давления предельного напряжения сдвига.

2. Исследование реологических свойств ОСВ показало, что основными характеристиками исследуемых ОСВ являются предельное напряжение сдвига и пластическая вязкость, которые зависят от концентрации суспензии.

3. Установлена связь между реологическими константами и концентрацией ОСВ.

## Список литературы

1. Арефьев Н. Н., Штин С. М. Метод определения реологических характеристик сапропеля // Горный информационно-аналитический бюл. М.: Изд-во МГГУ, 2007. № 1. С. 41 – 47.

2. Дегтярев В. Н. О взаимосвязи параметров, характеризующих течение вязкопластичных жидкостей в трубе, и ротационном вискозиметре // Нефтяное хозяйство. 1970. № 10. С. 64.

3. Мительман Б. И., Роземберг Г. Д. К вопросу о структурном режиме течения вязкопластичной жидкости по трубам // Тр. Всесоюз. НИИБТ. 1965. Вып. XV. С. 39-48.

4. Морозова Е. Н., Морозов В. А. Повышение надежности работы насосных станций водоотведения при проектировании и строительстве, как фактор улучшения экологической безопасности городов // Проектирование и строительство: сборник тезисов докладов научно-практической конференции. Курск, 2015. С. 39-40.

5. Морозова Е.Н., Морозов В.А., Морозов А.В. Особенности расчета совместной работы насосных станций и сетей водоотведения // Строительство-2016: материалы II Брянского междунар. инновационного форума. Брянск, 2016. Т.1. С. 88-91.

6. Огибалов П.М., Мирзаджанзаде А.Х. Нестационарные движения вязкопластичных сред. М.: Изд-во МГУ, 1970. 415 с.

7. Шелухин В. В. Модель жидкости Бингама в переменных напряжении-скорость // Докл. Академии наук. 2001. Т. 377, №4. С. 455-458.

8. Щербаков В. И., Морозов А. В. Прогнозирование рабочих характеристик центробежных насосов на осадках сточных вод // Яковлевские чтения: сб. докл. X науч.-техн. конф. М.: Изд-во АСВ, 2015. С. 61-65.

9. Шульман З.П. Конвективный тепло-массоперенос реологически сложных жидкостей. М.: Энергия, 1975. 352 с.

10. Щеглов К.А. Насосные станции для перекачки сточных вод и осадков. М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1987. 186 с.

11. Яковлев С.В. Инженерное оборудование зданий и сооружений: энциклопедия. М.: Стройиздат, 1994. 512 с.

12. Водоотводящие системы промышленных предприятий / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, Ю.В. Воронов. М.: Стройиздат, 1990. 511 с.

*Поступила в редакцию 20.06.18*

UDC 621.671.2

**V. A. Morozov**, Candidate of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Russia, 305040, Kursk, 50 Let Oktyabrya Str., 94) (e-mail: vamorozov46@list.ru)

**A. V. Morozov**, Candidate of Engineering Sciences, Southwest State University (Russia, 305040, Kursk, 50 Let Oktyabrya Str., 94) (e-mail: bumer777@list.ru)

**E. N. Morozova**, Post-Graduate Student, Southwest State University (Russia, 305040, Kursk, 50 Let Oktyabrya Str., 94) (e-mail: bumer777@km.ru)

## RESEARCH OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF RAINFALL OF SEWAGE

*One of problems of transfer of the rainfall of sewage (OSV) is use of impeller pumps for these purposes. Now displacement pumps, in particular screw are used. Application of impeller pumps is limited due to the lack of rheological characteristics of flowed through environments in this connection impeller pumps apply in the main ambassador of a dilution of OSV water that leads to padding energy consumptions.*

*Definition of rheological characteristics of OSV will allow to recommend impeller pumps for their transfer and will define their opportunities.*

*It is for this purpose offered to use a method of a capillary viscosimetry for definition of rheological constants (the ultimate strain of shift and viscosity) which characterize OSV which current is described by model of viscoplastic liquid.*

Definition of rheological constants of rainfall of sewage was carried out on production installation where performance characteristics of pumps with simultaneous definition of the OSV viscoplastic properties were removed.

Rheological constants OSV were defined by method of the accounting of hydraulic resistances on the fixed site of a round pipe depending on an expense of OSV and its concentration in the assumption that the current mode laminar.

It is established that unlike the Newtonian liquids all curve currents in a pipe depending on its concentration pass not through an origin of coordinates, and intercept that indicates the OSV viscoplastic properties. Driving begins to happen only after when pressure in a pipe is more than pressure of the ultimate strain of shift.

The research of rheological behavior of OSV showed that the main characteristics of the studied OSV are the ultimate strain of shift and plastic viscosity which depend on concentration of suspension.

Results of an experiment show that change of rheological characteristics of OSV depending on concentration depends on change of characteristics of pumps and corresponds to the existing recommendations about transfer of OSV pumps without watering.

Dependence between rheological characteristics of rainfall of sewage and their concentration is established.

**Key words:** settlements of sewage; rheological characteristics; pumps; viscosimetry; hydraulic losses; viscosity.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-5-66-72

**For citation:** Morozov V. A., Morozov A. V., Morozova E. N. Research of Rheological Characteristics of Rainfall of Sewage. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 5(80), pp. 66-72 (in Russ.).

\*\*\*

## Reference

1. Arefev H. H., Shtin S. M. Metod opredelenija reologicheskikh harakteristik sapropelja. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjul.* Moscow, 2007, no. 1, pp. 41 – 47.
2. Degtjarev V. N. O vzaimosvjazi para-metrov, harakterizujushchih techenie vjaskoplastichnyh zhidkostej v trube, i rotacionnom viskozimetre. *Neftjanoe hozjajstvo*, 1970, no. 10, pp. 64.
3. Mitel'man B. I., Rozemberg G. D. K voprosu o strukturnom rezhime techenija vjaskoplastichnoj zhidkosti po trubam. *Tr. Vsesojuz. NIIBT*, 1965, is. XV, pp. 39-48.
4. Morozova E. N., Morozov V. A. Povyshenie nadezhnosti raboty nasosnyh stancij vodootvedenija pri proektirovanii i stroitel'stve, kak faktor uluchshenija jekologicheskoi bezopasnosti gorodov. *Proektirovanie i stroitel'stvo*. Sbornik tezisev dokladov nauchno-prakticheskoi konferencii. Kursk, 2015, pp. 39–40.
5. Morozova E.N., Morozov V.A., Morozov A.V. Osobennosti rascheta sovmestnoj raboty nasosnyh stancij i setej vodootvedenija. *Stroitel'stvo-2016. Materialy II Brjanskogo mezhdunar. innovacionnogo foruma*. Brjansk, 2016, vol. 1, pp. 88-91.
6. Ogibalov P. M., Mirzadzhanzade A. H. Nestacionarnye dvizhenija vjaskoplastichnyh sred. Moscow, MGU Publ., 1970, 415 p.
7. Sheluhin V. V. Model' zhidkosti Bingham v peremennyh naprjazhenie-skorost'. *Dokl. Akademii nauk*, 2001, vol. 377, no.4, pp. 455–458.
8. Shherbakov V. I., Morozov A. V. Prognozirovanie rabochih harakteristik centrobezhnyh nasosov na osadkah stochnyh vod. *Jakovlevskie chtenija. Sb. dokl. X nauch.-tehn. konf.* Moscow, ASV Publ., 2015, pp. 61–65.
9. Shul'man Z.P. Konvektivnyj teplo-massoperenos reologicheskii slozhnyh zhidkostej. Moscow, 1975, 352 p.
10. Shheglov K.A. Nasosnye stancii dlja perekachki stochnyh vod i osadkov. Moscow, 1987, 186 p.
11. Jakovlev S.V. Inzhenernoe oborudovanie zdaniy i sooruzhenij. Moscow, Strojizdat Publ., 1994, 512 p.
12. Jakovlev S.V., Karelin Ja.A., Laskov Ju.M., Voronov Ju.V. Vodootvodjashhie si-stemy promyshlennyh predpriyatij. Moscow, Strojizdat Publ., 1990, 511 p.