

УДК 665.455:006.354

О. В. Матвиенко, Н. С. Фирсанова

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕЧЕНИЯ СГУЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Проведено исследование установившегося течения предельно дилатантной сгущающейся при сдвиге жидкости в цилиндрической трубе, определены зависимость расхода жидкости от перепада давления, зависимости для радиального распределения скорости и эффективной вязкости течения. Установлено, что при малых перепадах давления неньютоновские свойства среды можно не учитывать и с точностью, достаточной для инженерных расчетов, рассматривать течение ньютоновской жидкости с вязкостью, равной вязкости при нулевой скорости сдвига. При больших значениях перепада давления происходит сгущение и уплотнение среды, значительный рост эффективной вязкости, зависимость расхода жидкости от перепада давления становится нелинейной. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от перепада давления является немонотонной и характеризуется наличием минимума.

Ключевые слова: реология, вязкость, неньютоновские жидкости, сгущающиеся среды, дилатантность, гидравлическое сопротивление.

Суспензии и эмульсии относятся к материалам, роль которых в промышленном производстве очень велика. Их вязкость зависит от соотношения фаз, степени дисперсности, скорости течения и может сильно изменяться в технологическом процессе [1—3]. Реологические свойства таких систем определяют их технологические характеристики. Поэтому вопросам реологии уделено значительное внимание многих исследователей [4—12].

Для описания деформационного поведения различных структурированных дисперсных сред существует множество реологических моделей, передающих в определенном диапазоне напряжений сдвига отдельные особенности реального течения [13—16].

Моделирование гидродинамики течения пленки неньютоновской суспензии в цилиндрическом прямоточном гидроциклоне и расчет извлечения частиц твердой фазы при разделении неньютоновских суспензий с привлечением полных уравнений реодинамики выполнено в [18, 19]. Для описания реологических свойств суспензии использовано степенное реологическое уравнение Оствальда — де Вейля.

В [20] исследован процесс заполнения канала реологически сложной жидкостью со свободной поверхностью. Получены кинематические и динамические характеристики рассматриваемых течений в зависимости от определяющих параметров процесса и реологических свойств.

Математическому моделированию течений неньютоновских сред при наличии закрутки потока на входе в канал посвящены работы [21—26]. В них приведены результаты исследований влияния закрутки потока на структуру течения и формирование рециркуляционных зон для потоков жидкостей различной реологии.

В [27] исследована устойчивость жесткого состояния наклонного слоя нелинейно вязкой жидкости Уильямсона. Модель Уильямсона может

применяться для описания движения псевдопластических жидкостей, близких по своим свойствам к структурированным средам. Но в отличие от моделей структурированных сред в реологическом уравнении Уильямсона нет предельного напряжения сдвига.

В [28] приведены результаты исследования процессов модифицирования битумов в кавитационно-смесительном диспергаторе и инжекторном смесителе. В [29] разработана физико-математическая модель и выполнен расчет распада струи битума в закрученном потоке водной фазы. Показано, что рост закрутки потока приводит к интенсификации турбулентности в потоке и способствует более быстрому распаду струи. В [30] проведено численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вязжущих. Исследованию смешения коаксиальных закрученных потоков для приготовления битумных дисперсных систем посвящено [31].

Жидкости, сгущающиеся при воздействии касательных напряжений, представляют собой материал, вязкость которого резко увеличивается при увеличении скорости сдвига выше критического значения. Эти неньютоновские жидкости называются дилатантными жидкостями. При низких скоростях сдвига жидкости имеют низкую вязкость, действуют как смазка и легко текут. Однако при более высоких скоростях сдвига гидродинамические силы, действующие на частицы, преодолевают силы отталкивания. Это приводит к формированию гидрокластеров. Жидкость не может заполнить промежутки, создавшиеся между частицами, и трение сопротивления значительно увеличивается, вызывая увеличение вязкости [32]. Предельно дилатантные жидкости характеризуются резким увеличением вязкости при достижении критической скорости сдвига. В этом случае происходит агрегация гидрокластеров и формирование жесткой структуры. При уменьшении скорости сдвига гидрокластеры распадаются, так что кажущееся твердым вещество превращается в жидкость.

Механизм образования и распада гидрокластеров был экспериментально обнаружен в экспериментах [33] и подтвержден при компьютерном моделировании [34].

В [35] предложена реологическая модель среды с «отвердеванием». Особенность реологического поведения такой среды заключается в следующем. Кривая течения, построенная в координатах «скорость сдвига — касательное напряжение», при приближении скорости сдвига к некоторому критическому (но конечному) значению демонстрирует резкое возрастание своей кривизны. Дилатантное поведение жидкости усиливается настолько, что наиболее деформируемые области течения (где скорость сдвига непосредственно приближается к своему критическому значению) начинают вести себя подобно твердому телу.

Целью настоящей работы является исследование установившегося течения в цилиндрической трубе круглого сечения радиуса R предельно дилатантной сгущающейся при сдвиге жидкости.

Для построения моделей жидких сред нужно установить связь между девиаторами тензора скоростей деформации и тензора напряжений [1, 3]. В тензорно линейных моделях такая связь задается соотношением:

$$\tau_{ij} = 2\mu_{\text{eff}} \dot{\varepsilon}_{ij}^D. \quad (1)$$

В качестве вторых инвариантов тензоров $\dot{\varepsilon}$ и τ удобно ввести [4]:

$$U = \sqrt{2\dot{\varepsilon}_{ij}^D \dot{\varepsilon}_{ji}^D},$$

$$T = \sqrt{\tau_{ij} \tau_{ij} / 2}, \quad (2)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^D = \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}_{kk}$ — компоненты девиатора тензора скоростей деформации.

Из соотношения (1) вытекает следующее соотношение между инвариантами:

$$T = \mu_{\text{eff}} U, \quad (3)$$

где μ_{eff} — коэффициент эффективной динамической вязкости.

Если связь (3) установлена, то, подставляя ее в уравнения движения и присоединяя уравнение неразрывности, а также формулируя необходимые начальные и граничные условия, получим замкнутую систему для определения поля течения.

Реологический закон предельно дилатантной сгущающейся при сдвиге среды для установившегося течения в канале можно записать в виде:

$$\tau_{rx} = \frac{\sigma_y}{U_* - U} \frac{du}{dr} = -\frac{\sigma_y}{U_* - U} U,$$

$$U = \left| \frac{du}{dr} \right|. \quad (4)$$

В случае стабилизированного осесимметричного течения уравнение динамики вязкой жидкости приобретает вид:

$$\frac{1}{r} \frac{d\tau_{rx} r}{dr} = - \left| \frac{dp}{dx} \right|. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (1) позволяет определить зависимость сдвигового напряжения от радиальной координаты:

$$\tau_{rx} = -\frac{1}{2} \left| \frac{dp}{dx} \right| r. \quad (6)$$

С учетом реологического соотношения (3) определим интенсивность скоростей сдвиговых деформаций:

$$U = \frac{\frac{1}{2} \left| \frac{dp}{dx} \right| r U_*}{\left(\sigma_y + \frac{1}{2} \left| \frac{dp}{dx} \right| r \right)} = \frac{U_* r}{r_y + r}, \quad (7)$$

где $r_y = \frac{2\sigma_y}{|dp/dx|}$ — параметр модели.

С учетом соотношения (4) уравнение (7) может быть записано в виде:

$$\frac{du}{dr} = -\frac{U_* r}{r_Y + r}. \quad (8)$$

Выпишем необходимые граничные условия. На оси течения должны выполняться условия симметрии, а на стенке трубы — условия прилипания. В результате граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} r = 0, \quad \frac{du}{dr} &= 0; \\ r = R, \quad u &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Интегрирование уравнения (8) позволяет определить радиальное распределение осевой скорости в канале:

$$u = -U_* \left[r - R - r_Y \ln \left(\frac{r_Y + r}{r_Y + R} \right) \right]. \quad (10)$$

Максимальная скорость жидкости достигается на оси потока:

$$u_{\max} = U_* r_Y \left[\frac{R}{r_Y} - \ln \left(1 + \frac{R}{r_Y} \right) \right]. \quad (11)$$

Расход жидкости через поперечное сечение трубы вычисляется по формуле:

$$Q = 2\pi \int_0^R u r dr = 2\pi U_* \left[\frac{R^3}{6} - \frac{r_Y^3}{2} \ln \left(\frac{R + r_Y}{r_Y} \right) - \frac{1}{4} r_Y (R^2 - 2Rr_Y) \right], \quad (12)$$

а среднерасходная скорость определяется как:

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi R^2} = 2U_* \left[\frac{R}{6} - \frac{r_Y^3}{2R^2} \ln \left(\frac{R + r_Y}{r_Y} \right) - \frac{1}{4} r_Y \left(1 - 2\frac{r_Y}{R} \right) \right]. \quad (13)$$

Вязкие свойства потока можно характеризовать двумя величинами: эффективной вязкостью $\mu_{\text{эф}}$, определяющей локальные свойства течения, и среднерасходной вязкостью $\bar{\mu}$, определяющей интегральные свойства потока.

Эффективная вязкость сгущающейся жидкости для гидродинамически стабилизированного течения в цилиндрической трубе может быть рассчитана с помощью реологического соотношения:

$$\mu_{\text{эф}} = \frac{\sigma_Y}{U_* - U}. \quad (14)$$

Для определения распределения эффективной по радиусу трубы воспользуемся соотношением (7):

$$\mu_{\text{эф}} = \frac{\sigma_Y (r_Y + r)}{U_* r_Y} = \frac{\sigma_Y}{U_*} \left(1 + \frac{r}{r_Y} \right). \quad (15)$$

Определим среднерасходную вязкость неньютоновской жидкости $\bar{\mu}$ как вязкость ньютоновской жидкости, движущейся со среднерасходной скоростью \bar{u} в трубе радиусом R под действием перепада давления $\left| \frac{dp}{dx} \right|$.

Введение среднерасходной вязкости позволяет при проведении гидравлических расчетов вместо неньютоновской среды рассматривать ньютоновскую жидкость с вязкостью $\bar{\mu}$. Таким образом, среднерасходная вязкость потока будет равна:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{8} \frac{\sigma_y R}{U_* r_y} \left[\frac{1}{6} - \frac{1}{2} \left(\frac{r_y}{R} \right)^3 \ln \left(1 + \frac{R}{r_y} \right) - \frac{1}{4} \frac{r_y}{R} \left(1 - 2 \frac{r_y}{R} \right) \right]^{-1}. \quad (16)$$

В технических расчетах принято связывать перепад давления со среднерасходной скоростью течения с использованием коэффициента гидравлического сопротивления ζ , который характеризует безразмерное падение давления на единицу длины канала. Таким образом, перепад давления пропорционален динамическому напору и определяется зависимостью Дарси — Вейсбаха:

$$\left| \frac{dp}{dx} \right| = \zeta \frac{\rho \bar{u}^2}{4R}. \quad (17)$$

Подставляя в равенство (17) значения среднерасходной скорости из формулы (13), получим выражения для коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\zeta = 2 \frac{\sigma_y}{\rho U_*^2 r_y R} \left[\frac{1}{6} - \frac{r_y^3}{2R^3} \ln \left(\frac{R + r_y}{r_y} \right) - \frac{1}{4} \frac{r_y}{R} \left(1 - 2 \frac{r_y}{R} \right) \right]^{-2}. \quad (18)$$

Перейдем к анализу полученных результатов. При математическом моделировании диапазон изменения параметров был выбран следующим: напряжение структурирования — $\sigma_y = 1 \dots 40$ Па; Предельная скорость сдвига — $U_* = 5 \dots 80$ с⁻¹; перепад давления — $\left| dp/dx \right| = 100 \dots 2000$ Па/м; радиус канала составлял $R = 0,1$ м.

Проанализируем влияние реологических параметров U_* и σ_y , а также перепада давления $\left| dp/dx \right|$ на структуру течения сгущающейся жидкости.

Радиальное распределение скорости потока, рассчитанное для различных значений перепада давления и реологических параметров, представлено на рис. 1—3. На рисунке 1 показано радиальное распределение скорости, рассчитанное для различных значений предельной скорости сдвига U_* . Как видно из рисунка, зависимость $u(r)$ является монотонно убывающей, скорость потока уменьшается от оси к стенке трубы. Скорость течения на оси трубы достигает максимального значения, а на стенках трубы вследствие прилипания равна 0. В пристеночной области ($10r_y < r$) распределение скорости близко к линейному, что является характерным для течения дилатантных

сред. Нелинейные эффекты проявляются в периферийной и приосевой части потока. С увеличением значений U_* происходит уменьшение эффективной вязкости потока. При этом течение становится возможным при более высоких скоростях деформации. В результате среда становится более подвижной. Значения скорости увеличиваются по всему сечению трубы. Влияние характерного напряжения среды σ_y на структуру течения иллюстрирует рис. 2. Увеличение эффективной вязкости, вызванное увеличением σ_y , приводит к уменьшению скорости потока по всему сечению трубы. С ростом перепада давления увеличивается энергия, сообщаемая потоку. В результате этого скорость потока возрастает (рис. 3).

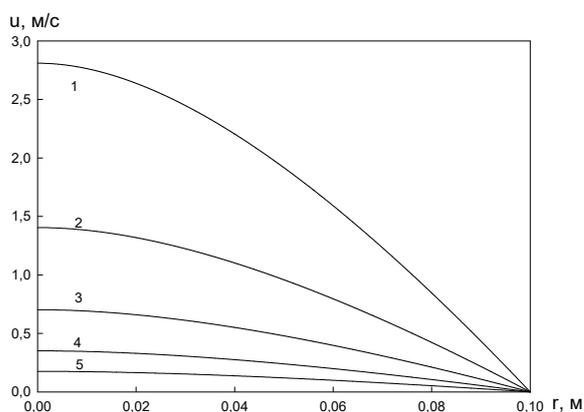


Рис. 1. Радиальное распределение скорости, $|dp/dx| = 250 \text{ Па/м}$, $\sigma_y = 10 \text{ Па}$:
1 — $U_* = 80 \text{ с}^{-1}$; 2 — $U_* = 40 \text{ с}^{-1}$; 3 — $U_* = 20 \text{ с}^{-1}$; 4 — $U_* = 10 \text{ с}^{-1}$; 5 — $U_* = 5 \text{ с}^{-1}$

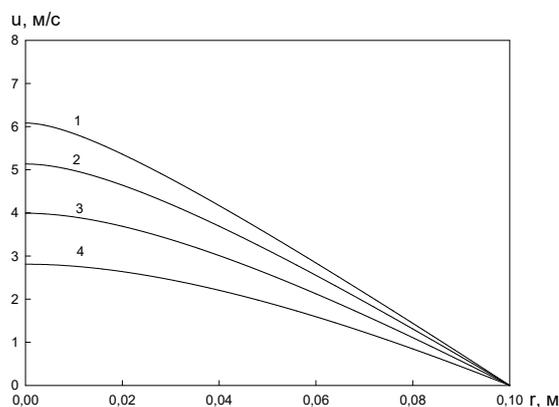


Рис. 2. Радиальное распределение скорости: $|dp/dx| = 250 \text{ Па/м}$, $U_* = 80 \text{ с}^{-1}$:
1 — $\sigma_y = 1,25 \text{ Па}$; 2 — $\sigma_y = 2,5 \text{ Па}$; 3 — $\sigma_y = 5 \text{ Па}$; 4 — $\sigma_y = 10 \text{ Па}$

Перейдем к анализу расходных характеристик. Для характеристики объемного расхода жидкости через поперечное сечение трубы удобно использовать среднерасходную скорость течения. Величина среднерасходной скорости про-

порциональна предельной скорости сдвиговых деформаций, а также зависит от напряжения структурирования σ_y и радиуса канала R . На рисунке 4 показана зависимость среднерасходной скорости от перепада давления $|dp/dx|$.

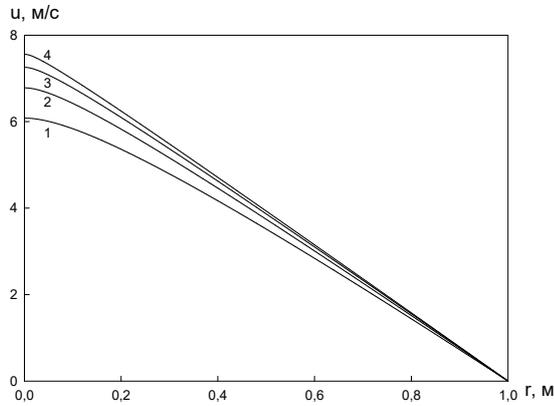


Рис. 3. Радиальное распределение скорости, $\sigma_y = 1,25 \text{ Па}$, $U_* = 80 \text{ с}^{-1}$: 1 — $|dp/dx| = 250 \text{ Па/м}$; 2 — $|dp/dx| = 500 \text{ Па/м}$; 3 — $|dp/dx| = 1000 \text{ Па/м}$; 4 — $|dp/dx| = 2000 \text{ Па/м}$

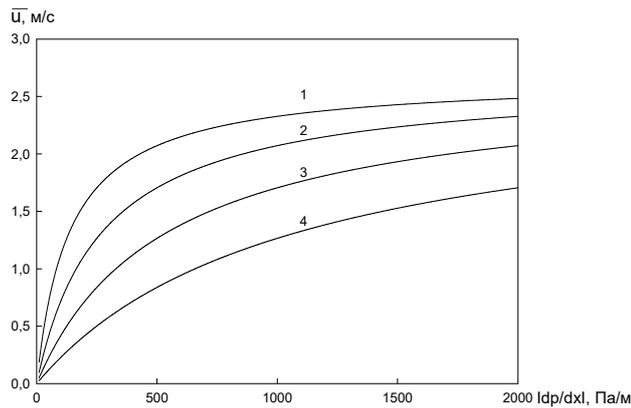


Рис. 4. Зависимость среднерасходной скорости от перепада давления $|dp/dx|$, $U_* = 80 \text{ с}^{-1}$: 1 — $\sigma_y = 5 \text{ Па}$; 2 — $\sigma_y = 10 \text{ Па}$; 3 — $\sigma_y = 20 \text{ Па}$; 4 — $\sigma_y = 40 \text{ Па}$

С увеличением перепада давления увеличивается энергия, сообщаемая потоку, что приводит к увеличению скорости течения. При малых значениях $|dp/dx|$ зависимость среднерасходной скорости от перепада давления сгущающейся жидкости $\bar{u} = \bar{u}(|dp/dx|)$ близка к линейной. При малых перепадах давления среднерасходная скорость сгущающейся жидкости близка по величине среднерасходной скорости ньютоновской жидкости с вязкостью, равной эффективной вязкости среды при нулевой скорости сдвига $\mu_0 = \frac{\sigma_y}{U_*}$. При больших значениях $|dp/dx|$ в результате действия сил давления происходит

сгущение и уплотнение среды, что вызывает замедление роста \bar{u} при увеличении перепада давления (см. рис. 4).

Анализ влияния напряжения структурирования σ_Y на зависимость величины среднерасходной скорости показывает, что с ростом σ_Y происходит уменьшение \bar{u} .

На рисунке 5 показано изменение коэффициента гидравлического сопротивления ζ с ростом перепада давления $|dp/dx|$ для различных значений реологических параметров. Как видно из рис. 5, зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от перепада давления является немонотонной. При низких значениях $|dp/dx|$, когда в потоке преобладают ньютоновские свойства, рост перепада давления приводит к росту кинетической энергии потока и уменьшению гидравлического сопротивления. При больших значениях $|dp/dx|$ гидравлическое сопротивление потока увеличивается, что связано со сгущением среды в результате ее структурировании. С увеличением значений напряжения структурирования возрастает диссипация механической энергии потока, что приводит к росту гидравлического сопротивления.

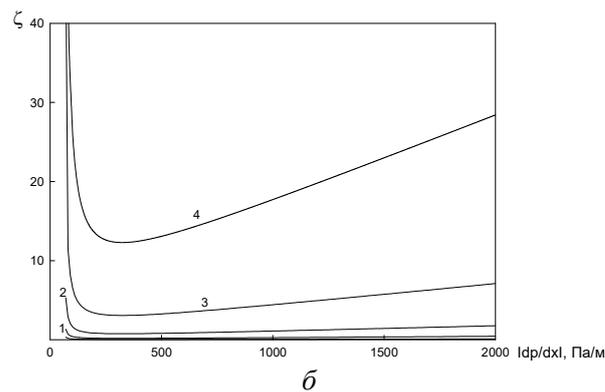
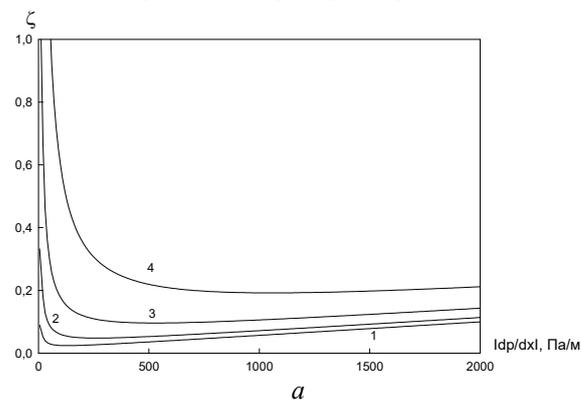


Рис. 5 Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ζ от перепада давления $|dp/dx|$, $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$, $U_* = 80 \text{ с}^{-1}$ — а: 1 — $\sigma_Y = 5 \text{ Па}$; 2 — $\sigma_Y = 10 \text{ Па}$; 3 — $\sigma_Y = 20 \text{ Па}$; 4 — $\sigma_Y = 40 \text{ Па}$; б: 1 — $U_* = 40 \text{ с}^{-1}$; 2 — $U_* = 20 \text{ с}^{-1}$; 3 — $U_* = 10 \text{ с}^{-1}$; 4 — $U_* = 5 \text{ с}^{-1}$

С увеличением предельной скорости сдвиговых деформаций U_* увеличивается диапазон вязкого течения, сгущение среды происходит при более высоких значениях скоростей сдвиговых деформаций. В результате этого с ростом U_* гидравлическое сопротивление в потоке уменьшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Malkin A. Ya., Isayev A. I. Rheology: Concepts, methods and applications. Toronto : ChemTec Publishing, 2006. 474 p.
2. Кутепов А. М., Полянин Л. Д., Запранов З. Д. Химическая гидродинамика : справочное пособие. М. : Бюро Квантум, 1996. 336 с.
3. Матвиенко О. В., Унгер Ф. Г., Базуев В. П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2015. 336 с.
4. Климов Д. М., Петров А. Г., Георгиевский Д. В. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость и перемешивание. М. : Наука, 2005. 394 с.
5. Wilkinson W. L. Non-Newtonian Fluids: Fluid Mechanics, Mixing and Heat Transfer. Elsevier Science & Technology, 1960. 138 p.
6. Barnes H. A. Thixotropy a review. Non-Newton // Fluid Mech. 1997. Vol. 70. Pp. 1—33.
7. Barnes H. A. The yield stress a review or 'panta rei' everything flows? Non-Newton // Fluid Mech. 1999. Vol. 81. Pp. 1—33.
8. Fredrickson A. G. Principles and Applications of Rheology. Prentice-Hall : Upper Saddle River, 1964. 326 p.
9. Bingham E. C. Fluidity and plasticity. New York : McGraw-Hill, 1922. 448 p.
10. Herschel W. H., Bulkley R. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzol-Loesungen // Kolloid Z. 1926. Vol. 39. Pp. 291—300.
11. Casson N. Rheology of disperse systems. Pergamon Press, Oxford, 1959. 223 p.
12. Островский Г. М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб. : Наука, 2000. 464 с.
13. Матвиенко О. В. Исследование установившегося течения псевдопластической жидкости, описываемой моделью Сиско, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 55. С. 99—112.
14. Исследование установившегося течения вязкопластического битумного вязущего, описываемого моделью Шведова — Бингама, в цилиндрической трубе / О. В. Матвиенко, В. П. Базуев, Н. Р. Сабылина, А. Е. Асеева, А. А. Суртаева // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 158—177.
15. Течение битумного вязущего, описываемого моделью Оствальда — де Вейля, в цилиндрической трубе / О. В. Матвиенко, В. П. Базуев, И. С. Черкасов, А. Е. Асеева, В. Н. Веник // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 171—192.
16. Матвиенко О. В., Литвинова А. Е. Исследование установившегося течения высокопарафинистого битумного вязущего, описываемого моделью Балкли — Гершеля, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 79—99.
17. Матвиенко О. В., Литвинова А. Е., Фирсанова Н. С. Исследование структуры течения полимерно-битумного вязущего, описываемого моделью Кросса, в трубе с внезапным расширением // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 151—168.
18. Яблонский В. О. Расчет разделения суспензий с неньютоновской дисперсионной средой в прямоточном цилиндрическом гидроциклоне // Химическая промышленность Т. 82. № 1. 2005. С. 40—48.
19. Яблонский В. О., Рябчук Г. В. Течение реологически сложной суспензии в цилиндрико-коническом гидроциклоне // Теоретические основы химической технологии. 2005. Т. 39. № 4. С. 355—361.
20. Борзенко Е. И., Якутенок В. А. Эволюция свободной поверхности при заполнении плоских каналов вязкой жидкостью // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2008. № 1. С. 24—30.

21. Матвиенко О. В., Базуев В. П., Южанова Н. К. Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 1. С. 192—199.
22. Матвиенко О. В., Базуев В. П., Дзюльзон Н. К. Математическое моделирование течения закрученного потока вязкопластической жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 5. С. 1129—1137.
23. Матвиенко О. В., Базуев В. П., Асеева А. Е. Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости Балкли — Гершеля в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 1. С. 215—226.
24. Матвиенко О. В., Базуев В. П., Асеева А. Е. Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости Балкли — Гершеля в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 6. С. 2641—2651.
25. Матвиенко О. В. Исследование теплообмена и формирования турбулентности во внутреннем закрученном потоке жидкости при низких числах Рейнольдса // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 4. С. 908—918.
26. Матвиенко О. В., Асеева А. Е. Математическое моделирование закрученного потока термовязкой псевдопластической жидкости Сиско в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 4. С. 857—869.
27. Перминов А. В. Устойчивость жесткого состояния обобщенной неньютоновской жидкости // Механика жидкости и газа. 2014. № 2. С. 6—15.
28. Базуев В. П., Матвиенко О. В., Вороненко В. Л. Моделирование процесса модифицирования битума в кавитационно-смесительном диспергаторе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 4. С. 121—128.
29. Матвиенко О. В., Эфа А. К., Базуев В. П., Евтюшкин Е. В. Численное моделирование распада турбулентной струи в спутном закрученном потоке // Известия вузов. Физика. 2006. Т. 49. № 6. С. 96—107.
30. Матвиенко О. В., Базуев В. П., Южанова Н. К. Численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вязущих // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2. С. 132—143.
31. Matvienko O. V., Bazuev V. P., Venik V. N., Smirnova N. G. Numerical investigation of Herschel — Bulkley fluids mixing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineeri. 2015. Pp. 012—034.
32. Dynamic properties of sandwich structures with integrated shear thickening fluids / C. Fischer, S. A. Braun, P. E. Bourban, V. Michaud, C. J. G. Plummer, J. A. E. Manson // Smart Materials and Structures. 2006. Vol. 15. Pp. 1467—75.
33. Maranzano B. J., Wagner N. J. Flow small angle neutron scattering measurements of colloidal dispersion microstructure evolution through the shear thickening transition // Journal of Chemical Physics. 2002. Vol. 117. Pp. 10291—302.
34. Catherall A. A., Melrose J. R., Ball R. C. Shear thickening and order-disorder effects in concentrated colloids at high shear rates // Journal of Rheology. 2000. Vol. 44. Pp. 1—25.
35. Колодежнов В. Н., Капранчиков С. С., Веретенников А. С. Математическое моделирование диссипативного разогрева в цилиндрическом канале для жидкости, демонстрирующей проявление эффекта «отвердевания», при реализации первой схемы течения // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-1. С. 21—24.

© Матвиенко О. В., Фирсанова Н. С., 2023

Поступила в редакцию
в апреле 2023 г.

Ссылка для цитирования:

Матвиенко О. В., Фирсанова Н. С. Исследование установившегося течения сгущающейся жидкости в цилиндрической трубе // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 2(91). С. 157—167.

Об авторах:

Матвиенко Олег Викторович — д-р физ.-мат. наук, проф., Томский государственный архитектурно-строительный университет. Российская Федерация, 634003, г. Томск, ул. Соляная, 2; matvolegv@mail.ru

Фирсанова Наталия Сергеевна — аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет. Российская Федерация, 634003, г. Томск, ул. Соляная, 2

Oleg V. Matvienko, Natalia S. Firsanova

Tomsk State University of Architecture and Building

STUDY OF THE STEADY FLOW OF A THICKENING LIQUID IN A CYLINDRICAL TUBE

The paper conducts a study of the established flow of the extremely dilatant condensing fluid in a cylindrical tube, determines the dependence of fluid flow on pressure drop, obtains dependencies for the radial distribution of velocity and effective viscosity of the flow. It has been established that with small pressure drops, the non-Newtonian properties of the medium can be ignored, and with an accuracy sufficient for engineering calculations, the flow of a Newtonian fluid with a viscosity of equal viscosity at zero shear rate can be considered. With large values of the pressure drop, thickening and compaction of the medium occurs. As a result, there is a significant increase in effective viscosity, the dependence of fluid flow on the differential pressure becomes nonlinear. The dependence of the coefficient of hydraulic resistance on the differential pressure is non-monotonous and is characterized by the presence of a minimum.

Key words: rheology, viscosity, non-Newtonian fluids, thickening media, dilatance, hydraulic resistance.

For citation:

Matvienko O. V., Firsanova N. S. [Study of the steady flow of a thickening liquid in a cylindrical tube]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Building. Series: Civil Engineering and Architecture], 2023, iss. 2, pp. 157—167.

About authors:

Oleg V. Matvienko — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building. 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634003, Russian Federation; matvo-[lev@mail.ru](mailto:matvo-lev@mail.ru)

Natalia S. Firsanova — Postgraduate student, Tomsk State University of Architecture and Building. 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634003, Russian Federation