

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 665.455:006.354

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-158-177

*О.В. МАТВИЕНКО^{1,2}, В.П. БАЗУЕВ¹, Н.Р. САБЫЛИНА²,
А.Е. АСЕЕВА², А.А. СУРТАЕВА¹,*

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Томский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО, ОПИСЫВАЕМОГО МОДЕЛЮ ШВЕДОВА – БИНГАМА, В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

В работе проведено исследование течения битумного вяжущего, описываемого моделью Шведова – Бингама, в цилиндрической трубе, определена зависимость расхода жидкости от перепада давления, получены зависимости для радиального распределения скорости и эффективной вязкости течения. В пристеночной части течения эффективная вязкость характеризуется низкими значениями. Однако в окрестности жесткой зоны наблюдается существенный рост значений эффективной вязкости. С ростом скоростей сдвиговых деформаций происходит уменьшение эффективной вязкости, что объясняется процессами разрушения микроструктуры среды. С увеличением перепада давления происходит уменьшение размеров жесткой зоны. С повышением предельного напряжения сдвига среда становится менее подвижной, жесткая зона, локализованная в приосевой части трубы, увеличивается в размерах. При этом значения скорости уменьшаются по всему сечению трубы. Вариация значений пластической вязкости не влияет на положение жесткой зоны. Проведенные исследования показали, что при значениях числа Бингама $Bn < 0,1$ неньютоновские свойства течения можно не учитывать и с точностью, достаточной для инженерных расчетов, рассматривать течение ньютоновской жидкости с вязкостью μ_p .

Ключевые слова: реология; вязкопластические среды; вязкость; неньютоновские жидкости; модель Шведова – Бингама.

Для цитирования: Матвиенко О.В., Базуев В.П., Сабылина Н.Р., Асеева А.Е., Суртаева А.А. Исследование установившегося течения вязкопластического битумного вяжущего, описываемого моделью Шведова – Бингама, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 158–177.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-158-177

O.V. MATVIENKO^{1,2}, V.P. BAZUEV¹, N.R. SBYLINA²,
A.E. ASEVA², A.A. SURTAEVA¹,

¹Tomsk State University of Architecture and Building,

²National Research Tomsk State University

SHVEDOV-BINGHAM MODEL OF STEADY FLOW OF VISCO-PLASTIC BITUMEN BINDER IN CYLINDRICAL TUBE

This paper studies the bitumen binder flow in terms of the Shvedov-Bingham model in a cylindrical tube. The dependence of the fluid flow rate on pressure drop is determined as well as the dependences between the radial velocity distribution and effective flow viscosity. Near the wall, the effective viscosity is low. However, in the vicinity of the rigid zone, a significant increase in the effective viscosity is observed. With increasing strain rates the effective viscosity decreases, which is explained by the destruction of the medium microstructure. With the pressure drop, the size of the hard zone decreases. With the increasing yield stress the fluid becomes less mobile, the rigid zone in the centre of the pipe increases in size. In this case, the velocity values decrease over the entire pipe section. Variation in the plastic viscosity does not affect the position of the rigid zone. It is shown that when the Bingham number $Bn < 0.1$, the non-Newtonian properties of the flow can be ignored. In this case, the Newtonian flow with viscosity μ_{pl} should be considered with an accuracy sufficient for engineering calculations.

Keywords: rheology; visco-plastic medium; viscosity; non-Newtonian fluids; Shvedov-Bingham model.

For citation: Matvienko O.V., Bazuev V.P., Sabylina N.R., Aseva A.E., Surtayeva A.A. Issledovanie ustanovivshegosya techeniya vyazkoplasticheskogo bitumnogo vyazhushchego, opisываемого model'yu Shvedova – Bingama, v tsilindricheskoj tube [Shvedov-Bingham model of steady flow of visco-plastic bitumen binder in cylindrical tube]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturostroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 20. No. 3. Pp. 158–177. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-158-177

Введение

Одним из основных материалов, применяемых в дорожном строительстве, является асфальтобетон, в состав которого входят щебень, песок, различные добавки и вязущее вещество. Основным видом вязущего, применяемого в дорожной отрасли, является нефтяной дорожный битум: пластичный, способный без разрушения выдерживать воздействие низких температур и температурных перепадов, а также различных деформаций [1, 2].

Битумные вязущие вещества состоят из высокомолекулярных углеводородов нафтенового, метанового и ароматического рядов и их соединений с кислородом, серой, азотом. Элементарный химический состав всех видов битума достаточно близок: 70–85 % углерода, 10–15 % водорода, 5–10 % кислорода, 1–5 % серы, до 1 % азота и незначительное количество некоторых металлов (V, Ni, Co, Fe, U) в виде сложных комплексов. Типичными для битумов являются функциональные группы: OH, -CH=CH-, COOR, COO, COOH. О качественном составе входящих в битумы углеводородов позволяет судить отношение C/H, для нафтеновых углеводородов оно выше, чем у парафиновых, для ароматических выше, чем у нафтеновых [3].

Основные технические характеристики битумов связаны с их реологическими свойствами, которые необходимо определять в широком диапазоне температур, диктуемом условиями применения этих материалов.

При низких температурах битумы ведут себя как упругие тела. Модуль деформации в этом случае идентичен модулю упругости и имеет для всех битумов значение около $E = 3 \cdot 10^3$ МПа. С увеличением температуры, длительности действия нагрузки и ее величины модуль деформации битумов существенно увеличивается, материал приобретает упругопластические свойства [4].

Переход битумов из упругопластического состояния в вязкопластическое происходит в интервале температур от 30 до 40 °С. При температуре выше 70 °С битумы становятся псевдопластическими, а при температуре более 100 °С – ньютоновскими жидкостями.

Вязкопластические свойства битумов в интервале температур от 30 до 70 °С объясняются их структурой. Если величина напряжения, приложенного к среде, мала, то течение происходит в пластическом режиме вдоль тонких слоев твердофазной структуры. Сопrotивление течению при этом велико, что объясняет высокие значения вязкости. Прочность структуры характеризуется предельным напряжением сдвига σ_y . При достижении этого напряжения происходит разрушение твердофазной структуры, что приводит к резкому уменьшению вязкости. Таким образом, при высоких сдвиговых напряжениях происходит течение вязкой жидкости, содержащей незначительное количество частиц твердого наполнителя [5].

Вязкость битумных вяжущих зависит от соотношения фаз, степени дисперсности, параметров течения [3] и описывается сложной функциональной зависимостью от градиента скорости. В настоящее время изучению особенностей течения неньютоновских сред со сложным реологическим поведением уделяется значительное внимание [6]. Подробный обзор исследований, посвященных течениям реологически сложных сред, приведен в монографиях [5–9].

В работах [10, 11] проведено исследование течения вязкопластических сред в канале с внезапным расширением. Показано, что в случае стационарного течения жидкости Шведова – Бингама в области уступа реализуется режим с образованием зоны квазитвердого течения [10]. В работе [11] для описания вязкопластических свойств среды использовалась модель Балкли – Гершеля. Проведено исследование установившегося течения как для ньютоновской жидкости с образованием циркуляционной области в области уступа, так и для неньютоновской среды с застойной зоной.

В работах [12–14] проведено моделирование течения жидкости Балкли – Гершеля со свободной поверхностью, реализующегося при заполнении каналов в поле силы тяжести. Выявлено три характерных режима заполнения: режим полного заполнения, промежуточный режим с образованием воздушных полостей на твердой стенке и струйный режим. Исследованы течения, и выявлены различные режимы заполнения для двух ориентаций направления течения относительно действия гравитационных сил.

В работе [15] разработана математическая модель процесса симметричного течения вязкопластической среды Балкли – Гершеля в зазоре вращающихся валков, учитывающая влияние гравитационных сил. Для вала единич-

ной длины найдены интегральные параметры: сила трения, величина распорного усилия, технологическая мощность процесса.

В работе [16] проведено численное моделирование течений вязкопластической несжимаемой среды в канале с периодически меняющимися стенками. Исследовано влияние предела текучести и амплитуды возмущения границы на расположение жестких зон.

В работе [17] в рамках реологической модели Шведова – Бингама получено точное решение модельной задачи о движении квазитвердого ядра неньютоновской жидкости в бесконечном плоском канале при скачкообразном изменении градиента давления. Проведено сравнение числовой оценки с аналогичными результатами, полученными ранее другими авторами приближенными методами.

Исследованию влияния закрутки на структуру течения неньютоновских сред посвящены работы [18–21]. Результаты исследований течения закрученного потока псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале [18] показывают, что с ростом сдвиговых напряжений, вызванных закруткой потока, эффективная вязкость уменьшается. В результате этого в приосевой части канала формируется зона пониженного давления, которая при меньшей закрутке потока приводит к образованию зоны возвратных течений. При течении дилатантных сред [19] с ростом сдвиговых напряжений, вызванных закруткой потока, происходит увеличение эффективной вязкости жидкости. При этом с увеличением показателя нелинейности размеры рециркуляционной зоны и интенсивность рециркуляции жидкости в ней уменьшаются. В работе [20] представлены результаты исследований течения закрученного потока вязкопластической жидкости Шведова – Бингама в цилиндрическом канале. Установлено, что с увеличением предельного напряжения сдвига и пластической вязкости воздействие закрутки на структуру течения становится менее выраженным: глубина провала осевой скорости уменьшается вплоть до полного его исчезновения.

При течении закрученного потока псевдопластической жидкости с пределом текучести Балкли – Гершеля в цилиндрическом канале при одном и том же числе Россби интенсивность рециркуляции тем больше, чем меньше значения предельного напряжения сдвига, консистенции и показателя нелинейности [21].

В работах [22–30] проведен цикл теоретических исследований процессов течения и модифицирования битумов в технологических устройствах. В статье [22] приведены результаты исследования процессов модифицирования битумов в кавитационно-смесительном диспергаторе (КСД). В работе [23] исследован процесс модификации битумов в инжекторном смесителе. Изучено влияние геометрических и режимных параметров установки и интенсивности закрутки потока на характеристики смешения. В работе [24] построена модель движения пузырька в закрученном потоке неньютоновской жидкости. Изучено влияние физических характеристик жидкости и скорости ее движения на динамику пузырька, что дает возможность оптимизировать процесс вспенивания битума, улучшая его свойства. В работах [25, 26] исследовано влияние закрутки на процессы турбулизации и реламинаризации потока битумных вязущих в техноло-

гических устройствах. В работе [27] проведено исследование особенностей течения и характеристик тепломассопереноса турбулизированной сильновязкой битумно-дисперсной среды при течении в охлаждаемом канале в прямоточном и закрученном потоках. Расчеты показывают, что тепло, возникающее в потоке вследствие вязкого трения, может оказывать значительное влияние на условия теплообмена со стенкой. В работах [28, 29] исследован процесс образования кавитационных пузырьков в кавитационно-смесительном диспергаторе. Установлено, что формирование зоны кавитации осуществляется в области пережима канала, где происходит значительное увеличение скорости потока и, соответственно, уменьшение давления. В работе [30] разработана физико-математическая модель и выполнен расчет распада струи битума в спутном закрученном потоке водной фазы. Показано, что рост закрутки потока приводит к интенсификации турбулентности в потоке и, следовательно, способствует более быстрому распаду струи. При этом становится более энергетически выгодным формирование капель меньшего размера.

Целью настоящей работы является исследование установившегося течения битумного вязущего, описываемого моделью Шведова – Бингама, в цилиндрическом канале.

Математическая модель

При описании движения жидких сред, как правило, используют подход Эйлера [31], в рамках которого рассматривают изменение скорости частиц, проходящих через определенную точку пространства.

Деформационное течение определяется тензором скоростей деформаций, компоненты которого в декартовой системе координат имеют вид

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (1)$$

Напряженное состояние среды описывается тензором напряжений σ_{ij} , который можно разложить на девиатор τ_{ij} и шаровую часть p , называемую давлением [32]:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}. \quad (2)$$

Для построения моделей жидких сред нужно установить связь между девиаторами тензора скоростей деформации и тензора напряжений [8, 33]. В тензорно-линейных моделях такая связь задаётся соотношениями

$$\tau_{ij} = 2K\dot{\varepsilon}_{ij}. \quad (3)$$

В классических моделях предполагается зависимость K только от второго инварианта девиатора тензора скоростей деформации. В качестве вторых инвариантов тензоров $\dot{\varepsilon}$ и σ удобно ввести

$$U = \sqrt{2\dot{\varepsilon}_{ij}^D \dot{\varepsilon}_{ji}^D}, \quad T = \sqrt{\tau_{ij} \tau_{ij} / 2}, \quad (4)$$

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

Из соотношения (3) вытекает следующее соотношение между инвариантами:

$$T = KU. \quad (5)$$

Если связь (5) установлена, то, подставляя её в уравнения движения и присоединяя уравнение неразрывности, а также формулируя необходимые начальные и граничные условия, получим замкнутую систему для определения поля течения.

К настоящему времени разработано большое количество реологических моделей, описывающих поведение неньютоновских сред [35]. Простейшей моделью вязкопластичной жидкости является модель Шведова – Бингама, линейно сочетающая предельное напряжение сдвига τ_Y и вязкость μ . [8, 34]. Предельное напряжение сдвига впервые было обнаружено русским ученым Ф.Н. Шведовым у растворов желатина, а затем американским ученым Ю. Бингамом у масляных красок, которые до этого считались ньютоновскими жидкостями.

Реологический закон Шведова – Бингама для вязкопластических сред для установившегося течения в канале можно записать в виде

$$\tau_{rx} = -\sigma_Y + \mu_{pl} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right), \text{ если } \sigma_Y < \mu \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right|; \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0, \text{ если } \sigma_Y > \mu \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right|. \quad (6)$$

Рассмотрим осесимметричное установившееся течение в круглой трубе радиуса R , которое происходит под действием заданного постоянного градиента давления:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\Delta p}{L} = \text{const}. \quad (7)$$

Координату x , отсчитываемую вдоль оси трубы, направим вниз по потоку. Ограничимся исследованием стабилизированного течения вдали от входного течения, когда жидкость движется параллельно оси трубы. Уравнение динамики для жидкости Шведова – Бингама приобретает вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu_{pl} \frac{\partial u}{\partial r} - \sigma_Y \right) \right] = \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (8)$$

Выпишем необходимые граничные условия. Характерной особенностью данной задачи является то, что кроме условий симметрии на оси течения и условий прилипания на твердой стенке необходимо задать условия перехода к пластическому режиму течения на границе жесткой зоны, которая, в свою очередь, подлежит определению.

Таким образом, при течении вязкопластической жидкости необходимо дополнительно определить границу области деформаций, на которой должны выполняться условия непрерывности скорости и равенства нулю тензора деформаций или, что эквивалентно, его интенсивности.

В результате граничные условия имеют вид

$$r = 0: \frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad r = r_Y: \frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad r = R: u = 0. \quad (9)$$

Интегрирование уравнения (8) с учетом граничных условий приводит к следующему результату:

$$\mu_{pl} \frac{\partial u}{\partial r} - \sigma_Y = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} r. \quad (10)$$

Таким образом, граница жесткой зоны может быть определена как

$$r_Y = 2\sigma_Y \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right|^{-1}. \quad (11)$$

В центре канала образуется зона движения, в которой деформации отсутствуют. При этом величина r_Y определяет условие, при котором возможно течение в канале. Течение в канале реализуется при выполнении условия $r_Y < R$, если $R < r_Y$, то происходит заклинивание канала, и течение становится невозможным.

Во внутренней области течения $r < r_Y$ среда движется как твердое тело с плоским профилем осевой скорости:

$$u = \frac{R^2}{4\mu_{pl}} \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right| \left(1 - \left(\frac{r_Y}{R} \right)^2 \right) - \frac{\sigma_Y R}{\mu_{pl}} \left(1 - \frac{r_Y}{R} \right). \quad (12)$$

В пристеночной области распределение осевой скорости имеет параболический характер:

$$u = \frac{R^2}{4\mu_{pl}} \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right| \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) - \frac{\sigma_Y R}{\mu_{pl}} \left(1 - \frac{r}{R} \right). \quad (13)$$

Расход жидкости через поперечное сечение трубы вычисляется по формуле

$$Q = 2\pi \int_0^R u r dr = \frac{\pi R^4}{8\mu_{pl}} \left| \frac{dp}{dx} \right| \left(1 - \frac{4}{3} \frac{r_Y}{R} + \frac{1}{3} \left(\frac{r_Y}{R} \right)^4 \right),$$

а среднерасходная скорость определяется как

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{R^2}{8\mu_{pl}} \left| \frac{dp}{dx} \right| \left(1 - \frac{4}{3} \frac{r_Y}{R} + \frac{1}{3} \left(\frac{r_Y}{R} \right)^4 \right). \quad (14)$$

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

Эффективная вязкость жидкости Шведова – Бингама μ_{eff} для гидродинамически стабилизированного течения в цилиндрической трубе может быть рассчитана с помощью реологического соотношения

$$\mu_{eff} = \mu_{pl} + \sigma_Y \left| \frac{du}{dr} \right|^{-1}. \quad (15)$$

Первое слагаемое в (15) μ_{pl} характеризует так называемую пластическую вязкость, второе – $\mu_{str} = \sigma_Y \left| \frac{du}{dr} \right|^{-1}$ – структурную вязкость, связанную

с необходимостью приложения напряжений, превосходящих предел текучести для разрушения структуры вязкопластической среды.

Для определения эффективной вязкости воспользуемся реологическим соотношением (10) с учетом радиального распределения скорости (12), (13). В результате в зоне ($r_Y < r$) течения получим

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_{\text{pl}} \frac{r}{r - r_Y}. \quad (16)$$

В жесткой зоне среда ведет себя как твердое тело с бесконечно большой вязкостью.

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 $\bar{\mu}$.

Для ньютоновской жидкости связь между перепадом давления и массовым расходом определяется выражением [24]

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\bar{\mu}} \left| \frac{dp}{dx} \right|. \quad (17)$$

Таким образом, среднерасходная вязкость потока $\bar{\mu}$ будет равна

$$\bar{\mu} = \mu_{\text{pl}} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{r_Y}{R} + \frac{1}{3} \left(\frac{r_Y}{R} \right)^4 \right)^{-1}. \quad (18)$$

В технических расчетах принято связывать перепад давления со среднерасходной скоростью течения с использованием коэффициента сопротивления ζ . Для этого предполагается, что перепад давления должен быть пропорционален динамическому напору:

$$\left| \frac{dp}{dx} \right| = \zeta \frac{\rho \bar{u}^2}{4R}. \quad (19)$$

Подставляя в равенство (19) значения $\left| \frac{dp}{dx} \right|$ из формулы (17), получим выражения для коэффициента сопротивления:

$$\zeta = 32 \frac{\bar{\mu}}{\rho \bar{u} R} = \frac{64}{\text{Re}}, \quad (20)$$

где $\text{Re} = \rho \bar{u} d / \bar{\mu}$ – число Рейнольдса, построенное по среднерасходной скорости \bar{u} , среднерасходной вязкости $\bar{\mu}$ и диаметру трубы $d = 2R$.

Равенство (20) выражает закон сопротивления для течения вязкопластической жидкости Шведова – Бингама.

Результаты математического моделирования

Перейдем к анализу полученных результатов. Диапазон изменения параметров был выбран следующим: предельное напряжение сдвига – $\sigma_Y = 0,1\text{--}10$ Па, пластическая вязкость изменялась в пределах $\mu_{pl} = 0,1\text{--}1$ Па·с, перепад давления – $|dp/dx| = 100\text{--}2000$ Па/м. Радиус канала составлял $R = 0,1$ м.

На рис. 1 показана зависимость относительной эффективной вязкости μ_{eff}/μ_{pl} от безразмерной радиальной координаты $\xi = r/R$. Это распределение, типичное для вязкопластических сред, имеет вид гиперболы. Вертикальная асимптота этой гиперболы смещена от оси течения на расстояние r_Y/R , что соответствует наличию в потоке жесткой зоны. Таким образом, в периферийной и пристеночной части течения эффективная вязкость характеризуется низкими значениями. Однако в окрестности жесткой зоны наблюдается существенный рост значений эффективной вязкости. В жесткой зоне при $\xi < r_Y/R$ эффективная вязкость $\mu_{eff}/\mu_{\infty} \rightarrow \infty$. Уменьшение эффективной вязкости вязкопластических сред с ростом скоростей сдвиговых деформаций в реологии объясняется процессами разрушения микроструктуры среды [2].

Анализ формулы (16) показывает, что эффективная вязкость потока прямо пропорциональна пластической вязкости μ_{pl} и нелинейным образом зависит от числа Бингама $Bn = r_Y/R$. Из рис. 1 видно, что с уменьшением значений Bn свойства среды приближаются к ньютоновским. Этот результат объясняется преобладающей ролью ньютоновских свойств течения в потоках с низкими значениями числа Bn .

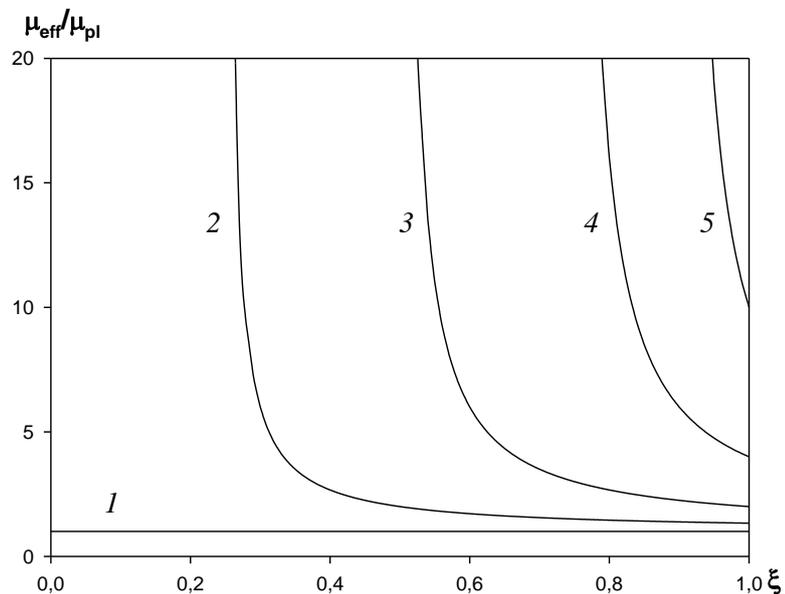


Рис. 1. Радиальное распределение относительной эффективной вязкости:
1 – $Bn = 0$ (ньютоновская жидкость); 2 – 0,25; 3 – 0,50; 4 – 0,75; 5 – 0,9

На рис. 2 показана зависимость относительного значения среднерасходной вязкости $\bar{\mu}/\mu_{pl}$ от перепада давления $\left|\frac{dp}{dx}\right|$.

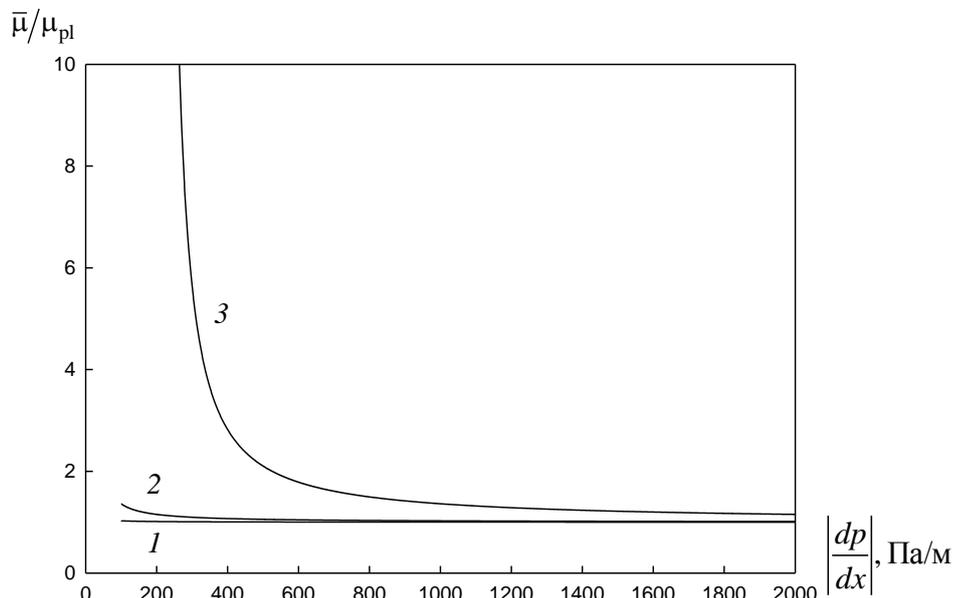


Рис. 2. Зависимость относительной величины среднерасходной вязкости $\bar{\mu}/\mu_{pl}$ от перепада давления $\left|\frac{dp}{dx}\right|$:
 1 – $\sigma_Y = 0,1$ Па; 2 – 1 Па; 3 – 10 Па

Как видно из рисунка, при малых значениях σ_Y неньютоновские свойства среды выражены слабо: отношение среднерасходной вязкости к пластической близко к единице. С увеличением σ_Y величина среднерасходной вязкости увеличивается. Этот эффект наиболее выражен для низкоскоростных потоков, движущихся при малом перепаде давления. С ростом перепада давления жидкость становится более подвижной. Это приводит к уменьшению значений $\bar{\mu}$.

При этом при больших значениях $\left|\frac{dp}{dx}\right|$ величина среднерасходной вязкости монотонно убывает, асимптотически стремясь к пластической вязкости μ_{pl} .

Результаты, представленные на рис. 2, можно систематизировать, если рассмотреть зависимость $\bar{\mu}/\mu_{pl}$ от числа Бингама Bn (рис. 3).

При $Bn = 0,1$ величина среднерасходной вязкости превышает μ_{pl} на 15 %. Однако с ростом значений числа Бингама Bn различие в значениях $\bar{\mu}$ и μ_{pl} увеличивается: при $Bn = 0,38$ величина среднерасходной вязкости в два раза превышает μ_{pl} , а при $Bn = 0,76$ – в десять раз. Отметим, что при $Bn \rightarrow 1$

величина среднерасходной вязкости $\bar{\mu} \rightarrow \infty$. Этот факт объясняется тем, что в потоках с малыми значениями числа Bn преобладают ньютоновские свойства, а при больших значениях числа Bn – нелинейные свойства, связанные со структурированием среды. Таким образом, если при течении вязкопластической жидкости число Бингама $Bn < 0,10$, то неньютоновские свойства течения проявляются незначительно, и с точностью, достаточной для инженерных расчетов, можно рассматривать течение ньютоновской жидкости с вязкостью μ_{pl} .

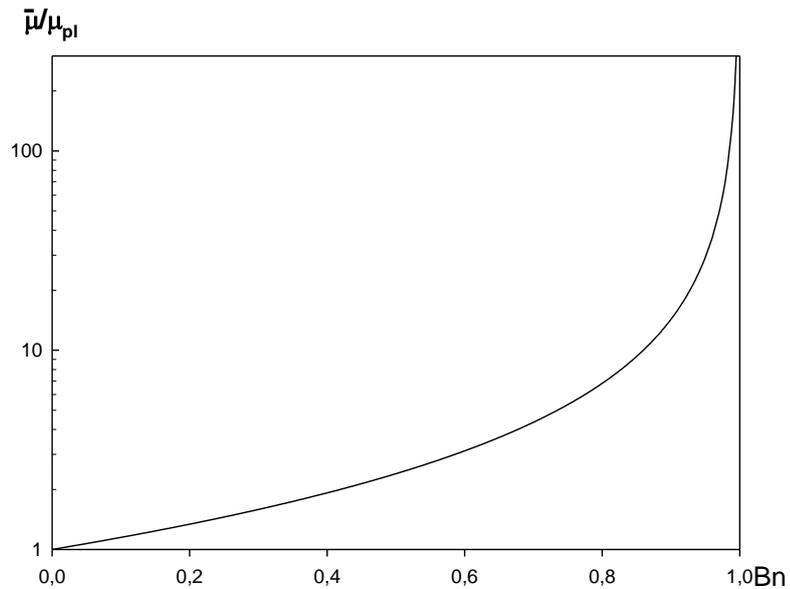


Рис. 3. Зависимость относительной величины среднерасходной вязкости $\bar{\mu}/\mu_{\infty}$ от числа Бингама

На рис. 4 представлены радиальные распределения скорости, рассчитанные для одних и тех же значений реологических параметров μ_{pl} , σ_Y , но различных перепадов давления. Из рисунка хорошо заметны основные отличительные черты вязкопластического течения: квазитвердый профиль в приосевой зоне и параболический в пристеночной области. С увеличением перепада давления $\left| \frac{dp}{dx} \right|$ происходит уменьшение размеров жесткой зоны. Эффективная вязкость среды уменьшается с ростом перепада давления, это приводит к увеличению скорости потока.

С увеличением предельного напряжения сдвига σ_Y среда становится менее подвижной, жесткая зона, локализованная в приосевой части трубы, увеличивается в размерах (рис. 5). В результате расход жидкости уменьшается. При этом значения скорости уменьшаются по всему сечению трубы.

Вариация значений пластической вязкости μ_{pl} не влияет на положение жесткой зоны. Однако с ростом μ_{pl} происходит увеличение эффективной вяз-

кости потока, что приводит к росту гидравлического сопротивления. В результате происходит уменьшение скорости потока и расхода жидкости (рис. 6).

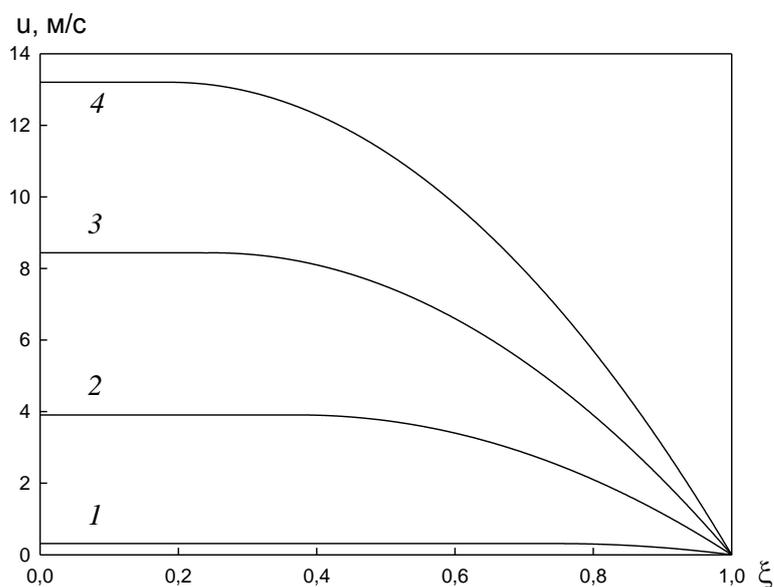


Рис. 4. Радиальное распределение скорости. $\mu_{pl} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\sigma_Y = 7,5 \text{ Па}$:

$$1 - \left| \frac{dp}{dx} \right| = 200 \text{ Па/м}; 2 - 400 \text{ Па/м}; 3 - 600 \text{ Па/м}; 4 - 800 \text{ Па/м}$$

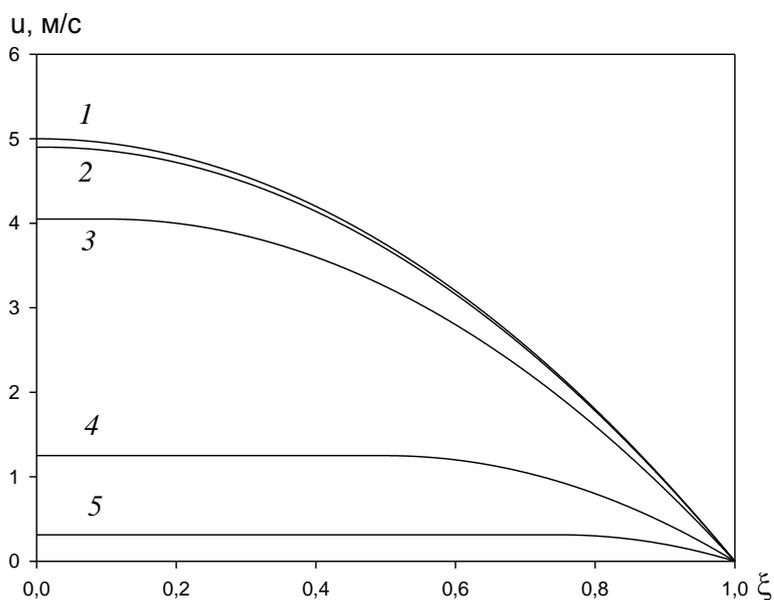


Рис. 5. Радиальное распределение скорости. $\left| \frac{dp}{dx} \right| = 200 \text{ Па/м}$, $\mu_{pl} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$:

$$1 - \sigma_Y = 0 \text{ (ньютоновская жидкость)}; 2 - \sigma_Y = 0,1 \text{ Па}; 3 - 1 \text{ Па}; 4 - 5 \text{ Па}; 5 - 7,5 \text{ Па}$$

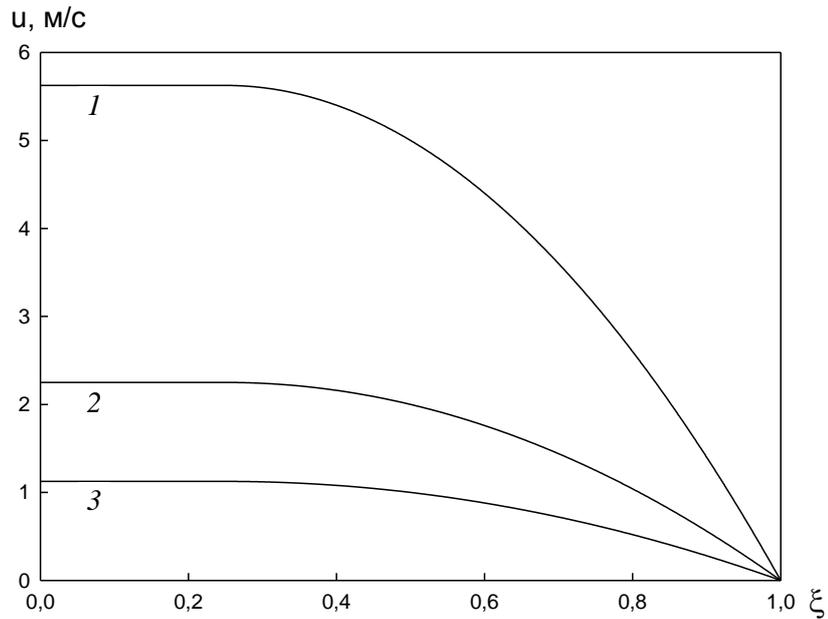


Рис. 6. Радиальное распределение скорости. $\left| \frac{dp}{dx} \right| = 400 \text{ Па/м}$, $\sigma_Y = 5 \text{ Па}$
 1 – $\mu_{pl} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 2 – $0,25 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 3 – $0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$

Заполненность профиля скорости характеризует параметр $\lambda = 2\bar{u}/u_{\max}$, представляющий отношение удвоенного значения среднерасходной скорости к скорости на оси течения. Для ньютоновской жидкости $\lambda = 1$. При течении вязкопластической жидкости Шведова – Бингама λ является функцией числа Bn

$$\lambda = 1 + \frac{2}{3} Bn + \frac{1}{3} Bn^2. \quad (21)$$

Результаты расчетов показывают, что $\lambda > 1$. Это свидетельствует о большей заполненности профиля скорости: радиальное распределение скорости с ростом числа Bn становится более пологим. С уменьшением значений числа Бингама Bn ньютоновские свойства становятся доминирующими. В результате этого профиль скорости становится менее заполненным, а значения $\lambda \rightarrow 1$ (рис. 7).

На рис. 8 показано изменение коэффициента гидравлического сопротивления ζ с ростом перепада давления $\left| \frac{dp}{dx} \right|$ для различных значений пластической вязкости μ_{pl} и предельного напряжения сдвига σ_Y . С увеличением значений пластической вязкости μ_{pl} возрастает диссипация механической энергии потока, что приводит к росту гидравлического сопротивления. Неньютоновские свойства среды, обусловленные наличием внутренней структуры, приводят к увеличению гидравлического сопротивления. Наибольшее

увеличение ζ с ростом предельного напряжения сдвига σ_Y происходит при малых значениях перепада давления $\left| \frac{dp}{dx} \right|$.

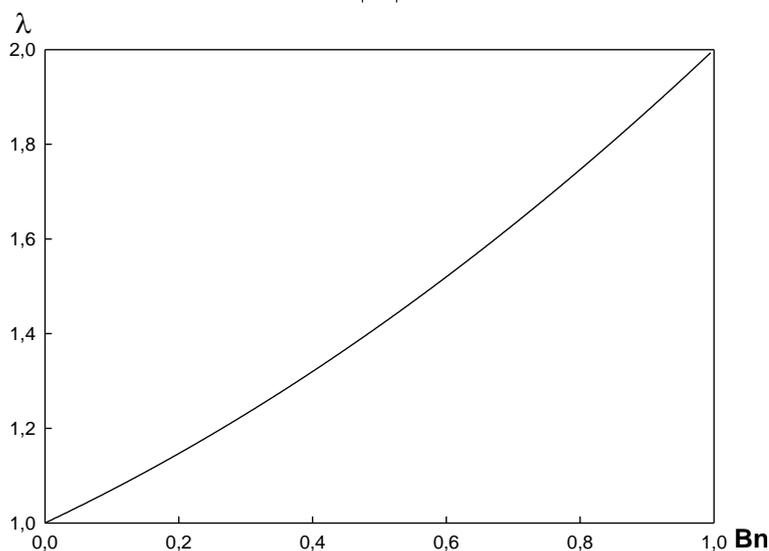


Рис. 7. Зависимость коэффициента заполнения профиля скорости от числа Бингама

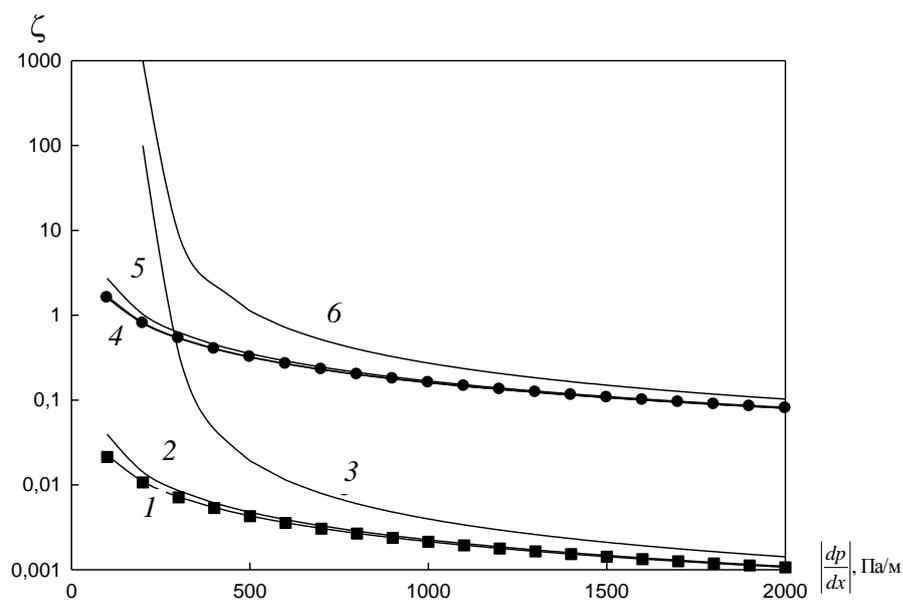


Рис. 8. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от перепада давления: $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$; 1 – $\mu_{pl} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\sigma_Y = 0,1 \text{ Па}$; 2 – $\mu_{pl} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\sigma_Y = 1 \text{ Па}$; 3 – $\mu_{pl} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\sigma_Y = 10 \text{ Па}$; 4 – $\mu_{pl} = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\sigma_Y = 0,1 \text{ Па}$; 5 – $\mu_{pl} = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\sigma_Y = 1 \text{ Па}$; 6 – $\mu_{pl} = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\sigma_Y = 10 \text{ Па}$; ● – $\mu = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (ньютоновская жидкость); ■ – $\mu = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (ньютоновская жидкость)

При малых значениях предельного напряжения сдвига σ_Y вклад структурной вязкости μ_{str} в рост гидравлического сопротивления незначителен. При больших σ_Y коэффициент гидравлического сопротивления жидкости Шведова – Бингама существенно превышает коэффициент сопротивления ньютоновской жидкости с вязкостью $\mu = \mu_{pl}$, движущейся под тем же перепадом давления.

С увеличением значений $\left| \frac{dp}{dx} \right|$ гидравлическое сопротивление потока уменьшается. При больших значениях перепада давления $\left| \frac{dp}{dx} \right|$ величина коэффициента гидравлического сопротивления ζ , рассчитанная для жидкости Шведова – Бингама, приближается к значениям, рассчитанным для ньютоновской жидкости с вязкостью μ_{pl} .

Для определения влияния неньютоновских свойств среды можно рассмотреть отношение коэффициента гидравлического сопротивления жидкости Шведова – Бингама ζ к коэффициенту гидравлического сопротивления ньютоновской жидкости ζ_N с вязкостью $\mu = \mu_{pl}$. С учетом соотношений (14), (18) это отношение равно

$$\varphi = \frac{\zeta}{\zeta_N} = \left(1 - \frac{4}{3} Bn + \frac{1}{3} Bn^4 \right)^{-2}. \quad (22)$$

Зависимость $\varphi = \varphi(Bn)$ представлена на рис. 9.

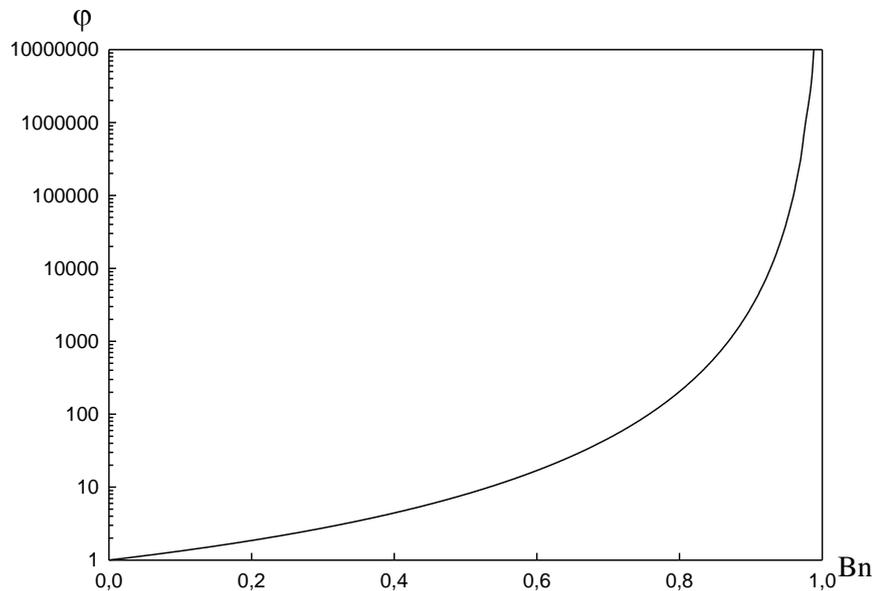


Рис. 9. Влияние числа Бингама на гидравлическое сопротивление

Как видно из рисунка, φ монотонно возрастает с ростом числа Бингама. При $Bn = 0,1$ коэффициент гидравлического сопротивления жидкости Шведова – Бингама на треть превышает коэффициент гидравлического сопротивления ньютоновской жидкости: $\varphi = 1,33$, при $Bn = 0,54$ происходит десятикратное увеличение гидравлического сопротивления, при $Bn \rightarrow 1$ величина $\varphi \rightarrow \infty$.

Заключение

Проведенные исследования показали, что при значениях числа Бингама $Bn < 0,1$ неньютоновские свойства течения можно не учитывать.

Для $Bn > 0,2$ коэффициент гидравлического сопротивления жидкости Шведова – Бингама существенно превышает коэффициент сопротивления ньютоновской жидкости с вязкостью μ_{pl} , движущейся под тем же перепадом давления.

Распределение эффективной вязкости имеет вид гиперболы. Вертикальная асимптота этой гиперболы смещена от оси течения на расстояние r_y/R , что соответствует наличию в потоке жесткой зоны. С увеличением пластической вязкости μ_{pl} и предельного напряжения сдвига σ_y величина среднерасходной вязкости уменьшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабак О.Г., Старков Г.Б. Применение модифицированных вязущих в дорожном строительстве // Дорожная техника и технологии. 2001. № 5. С. 72–75.
2. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Смирнова Н.Г., Пушкарева Г.В., Дульзон Н.К. Исследование смещения коаксиальных закрученных потоков для приготовления битумных дисперсных систем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3 (44). С. 123–134.
3. Гун Р.Б. Нефтяные битумы. М. : Химия, 1973. 432 с.
4. Грушников И.Б. Производство нефтяных битумов. М. : Химия, 1983. 192 с.
5. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб. : Профессия, 2007. 560 с.
6. Матвиенко О.В., Унгер Ф.Г., Базуев В.П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2015.
7. Кутепов А.М., Полянин Л.Д., Запryanov З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А. Химическая гидродинамика : справочное пособие. М. : Бюро Квантум, 1996.
8. Климов Д.М., Петров А.Г., Георгиевский Д.В. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость и перемешивание. М. : Наука, 2005.
9. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. М. : Мир, 1964.
10. Алексеева К.Г., Борзенко Е.И. Структура течения жидкости Шведова – Бингама в канале со скачком сечения // Известия вузов. Физика. 2012. № 7-2. С. 15–19.
11. Турбин М.В. Исследование начально-краевой задачи для модели движения жидкости Гершеля – Балкли // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. 2013. № 2. С. 246–257.
12. Борзенко Е.И., Рыльцов И.А., Шрагер Г.Р. Кинематика течения жидкости Балкли – Гершеля со свободной поверхностью при заполнении канала // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2017. № 5. С. 53–64.
13. Борзенко Е.И., Шрагер Г.Р., Якутенок В.А. Течение неньютоновской жидкости со свободной поверхностью при заполнении круглой трубы // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 53. № 2. С. 53–60.
14. Борзенко Е.И., Шрагер Г.Р., Якутенок В.А. Моделирование процесса заполнения плоских каналов вязкопластичной жидкостью // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45. № 2. С. 187–193.

15. *Зубович С.О.* Анализ математической модели симметричного течения тяжелой вязкопластической среды Гершеля – Балкли в зазоре вращающихся валков // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. Т. 1. № 3. С. 130–133.
16. *Муравлева Л.В.* Течения вязкопластической среды Бингама – Ильюшина в симметричном канале переменной ширины // Вестник Московского университета. Сер. 1. Матем., мех. 2012. № 3. С. 65–67.
17. *Вишняков В.И., Покровский Л.Д.* К теории нестационарных течений вязкопластических сред // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 8. Условия доступа : <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/876.html>
18. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К.* Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 3. С. 544–547.
19. *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.
20. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Дульзон Н.К.* Математическое моделирование течения закрученного потока вязкопластической жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 5. С. 1129–1137.
21. *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.
22. *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.
23. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Туркасова Н.Г., Байгулова А.И.* Исследование процесса модификации битума в инжекторном смесителе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 3. С. 202–213.
24. *Матвиенко О.В., Агафонцева М.В., Базуев В.П.* Исследование динамики пузырька в закрученном потоке нелинейно-вязкой жидкости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4. С. 144–156.
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., Базуев В.П., Южанова Н.К.* Численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вяжущих // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2. С. 132–143.
27. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Дульзон Н.К., Смирнова Н.Г., Агафонова М.В.* Численное исследование структуры течения и теплообмена при закрученном течении битумно-дисперсных систем в цилиндрических каналах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2 (43). С. 80–93.
28. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Смирнова Н.Г.* Численное исследование процесса образования кавитационных пузырьков в смесительном устройстве // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 231–245.
29. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Смирнова Н.Г.* Экспериментальное исследование процесса кавитации в технологических устройствах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6. С. 165–176.
30. *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.
31. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1974.
32. *Матвиенко О.В.* Численное исследование течения неньютоновских жидкостей в цилиндрическом канале // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 8-2. С. 183–189.

33. 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.
34. Матвиенко О.В., Евтюшкин Е.В. Математическое исследование сепарации дисперсной фазы в гидроциклоне при очистке вязкопластических буровых растворов // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 2. С. 243–252.
35. 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 Engineering. Ser. «International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering, TSUAB 2014». 2015. С. 012034.

REFERENCES

1. Babak O.G., Starkov G.B. Primeneniye modifitsirovannykh vyazhushchikh v dorozhnom stroitel'stve [Application of modified binders in road construction]. *Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii*. 2001. No. 5. P. 72–75. (rus)
2. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Smirnova N.G., Pushkareva G.V., Dulzon N.K. Issledovaniye smesheniya koaksial'nykh zakruchennykh potokov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [A study of mixing coaxial swirling flows for preparation of asphalt dispersion systems]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 3 (44). Pp. 123–134. (rus)
3. Gun R.P. Neftyanyye bitumy. [Oil bitumens]. Moscow: Khimia, 1973. 432 p. (rus)
4. Grudnikov I.B. Proizvodstvo neftyanykh bitumov [Production of oil bitumen]. Moscow: Khimia, 1983. 192 p. (rus)
5. Malkin A.Y., Isaev A.I. Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya [Rheology: concepts, methods, applications]. St.-Petersburg: Professiya, 2007. 560 p. (rus)
6. Matvienko O.V., Unger F.G., Bazuev V.P. Matematicheskiye modeli proizvodstvennykh protsessov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [Mathematical models of manufacturing processes for the preparation of dispersed bitumen systems]. Tomsk: TSUAB, 2015. (rus)
7. Kutepov A.M., Polyatin L.D., Zapryanov Z.D. Vyaz'min A.V., Kazenin D.A. Khimicheskaya gidrodinamika: spravochnoye posobiye [Chemical hydro-dynamics: handbook]. Moscow: Byuro Kvantum, 1996. (rus)
8. Klimov D.M., Petrov A.G., Georgievsky D.V. Vyazkoplachesticheskiye techeniya: dinamicheskiy khaos, ustoychivost' i peremeshivaniye [Visco-plastic flows: dynamic chaos, stability and mixing]. Moscow: Nauka, 2005. (rus)
9. Wilkinson W.L. Non-Newtonian fluids. New York – London: Pergamon Press, 1960.
10. Alekseeva K.G., Borzenko E.I. Struktura techeniya zhidkosti Shvedova – Bingama v kanale so skachkom secheniya [Structure of the Shvedov-Bingham flow in the channel with section jump]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2012. No. 7-2. Pp. 15–19. (rus)
11. Turbin M.V. Issledovaniye nachal'no – krayevoy zadachi dlya modeli dvizheniya zhidkosti Gershelya – Balkli [Initial boundary value problem for the model of Herschel-Bulkley fluid]. *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. Ser. Fizika. Matematika*. 2013. No. 2. P. 246–257. (rus)
12. Borzenko E.I., Ryltsov I.A., Shrager G.R. Kinematika techeniya zhidkosti Balkli – Gershelya so svobodnoy poverkhnost'yu pri zapolnenii kanala [Kinematics of Herschel-Bulkley fluid with free surface in channel filling]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*. 2017. No. 5. Pp. 53–64. (rus)
13. Borzenko E.I., Shrager G.R., Yakutenok V.A. Techeniye nen'yutonovskoy zhidkosti so svobodnoy poverkhnost'yu pri zapolnenii krugloy trubyy [Flow of non-Newtonian fluid with free surface in round tube filling]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2012. V. 53. No. 2. Pp. 53–60. (rus)
14. Borzenko E.I., Shrager G.R., Yakutenok V.A. Modelirovaniye protsessa zapolneniya ploskikh kanalov vyazkoplachestichnoy zhidkost'yu [Modeling of filling flat channels with visco-plastic fluid]. *Theoretical Foundations of Chemical Technology*. 2011. V. 45. No. 2. Pp. 187–193. (rus)
15. Zubovich S.O. Analiz matematicheskoy modeli simmetrichnogo techeniya tyazhelyo vyazkoplachesticheskoy sredy Gershelya – Balkli v zazore vrashchayushchikhysya valkov [Math-

- ematical model of symmetric flow of heavy visco-plastic Herschel-Bulkley fluid in the gap of rotating rolls]. *Izvestia. Volgograd. State Tech. Univ.* 2010. V. 1. No. 3. Pp. 130–133. (rus)
16. Muravleva V.V. Teleniya vyazkoplachestkoy sredy Bingama – Il'yushina v simmetrichnom kanale peremennoy shiriny [Flows of a Bingham–Ilyushin viscoplastic fluid in symmetric channel of variable width]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 1. Matem., mekh.* 2012. No. 3. Pp. 65–67. (rus)
 17. Vishnyakov V.I., Pokrovsky L.D. K teorii nestatsionarnykh techeniy vyazkoplachestkikh sred. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Theory of unsteady flows of visco-plastic media]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii.* 2013. No. 8. Available: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/876.html> (rus)
 18. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of pseudoplastic fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal.* 2011. V. 84. No. 3. Pp. 544–547. (rus)
 19. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka dilatantnoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of dilatant fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal.* 2014. V. 87. No. 1. Pp. 192–199. (rus)
 20. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dulzon N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka vyazkoplachestkoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of pseudoplastic fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal.* 2014. V. 87. No. 5. Pp. 1129–1137. (rus)
 21. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoy zhidkosti Balkli – Gershelya v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of pseudo-plastic Bulkley – Herschel fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal.* 2019. V. 92. No. 1. Pp. 215–226. (rus)
 22. Bazuev V.P., Matvienko O.V., Voronenko V.L. Modelirovaniye protsessa modifitsirovaniya bituma v kavitatsionno-smesitel'nom dispergatore [Modeling of the process of modifying bitumen in a cavitation mixing disperser]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2010. No. 4. Pp. 121–128. (rus)
 23. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Turkasova N.G., Baygulova A.I. Issledovaniye protsessa modifikatsii bituma v inzhektorom smesitele [Investigation of bitumen modification in injector mixer]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2013. No. 3. Pp. 202–213. (rus)
 24. Matvienko O.V., Agafontseva M.V., Bazuev V.P. Issledovaniye dinamiki puzyr'ka v zakruchennom potoke nelineynno-vyazkoy zhidkosti [Investigation of bubble dynamics in swirling flow of nonlinear viscous fluid]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2012. No. 4. Pp. 144–156. (rus)
 25. Matvienko O.V. Issledovaniye teploobmena i formirovaniya turbulentnosti vo vnutrennem zakruchennom potoke zhidkosti pri nizkikh chislakh Reynol'dsa [Heat transfer and formation of turbulence in internal swirling fluid flow at low Reynolds numbers]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal.* 2014. V. 87. No. 4. Pp. 908–918. (rus)
 26. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Chislennoye issledovaniye perekhoda k turbulentnomu rezhimu techeniya vnutrennikh zakruchennykh potokov bitumnykh vyazhushchikh [Numerical investigation of transition to the turbulent mode of internal swirl flows of bitumen binders]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2013. No. 2. Pp. 132–143. (rus)
 27. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dulzon N.K., Smirnova N.G., Agafonova M.V. Chislennoye issledovaniye struktury techeniya i teploobmena pri zakruchennom techenii bitumno-dispersnykh sistem v tsilindricheskikh kanalakh [Numerical investigation of flow structure and heat exchange of swirling flows of disperse bitumen systems in cylindrical channels]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2014. No. 2 (43). Pp. 80–93. (rus)
 28. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Chislennoye issledovaniye protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyr'kov v smesitel'nom ustroystve [Computational investigation of cavitation in cavitation disperser]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2014. No. 4 (45). Pp. 231–245. (rus)
 29. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Eksperimental'noye issledovaniye protsessa kavitatsii v tekhnologicheskikh ustroystvakh [Experimental study of cavitation in

- different apparatuses]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. P. 165–176. (rus)
30. *Matvienko O.V., Efa A.K., Bazuev V.P., Evtuyushkin E.V.* Chislennoye modelirovaniye raspada turbulentnoy strui v sputnom zakruchennom potoke [Numerical modeling of decay of turbulent jet in wake swirling flow]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2006. V. 49. No. 6. Pp. 96–107. (rus)
 31. *Loitsyansky L.G.* Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of liquid and gas]. Moscow: Nauka, 1974. (rus)
 32. *Matvienko O.V.* Chislennoye issledovaniye techeniya nen'yutonovskikh zhidkostey v tsilindricheskom kanale [Numerical investigation of flow of non-Newtonian fluids in cylindrical channel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2014. V. 57. No. 8-2. Pp. 183–189. (rus)
 33. *Matvienko O.V.* Issledovaniye ustanovivshegosya techeniya psevdoplasticheskoy zhidkosti, opisuyayemoy model'yu Sisko, v tsilindricheskoy trube [Steady state flow of pseudo-plastic fluid described by the Sisco model in cylindrical tube]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2018. No. 55. Pp. 99–112. (rus)
 34. *Matvienko O.V., Evtuyushkin E.V.* Matematicheskoye issledovaniye separatsii dispersnoy fazy v gidrotsiklone pri oчитке вязкопластических буровых растворов [Mathematical investigation of disperse phase separation in hydrocyclone in purifying visco-plastic mud]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2011. V. 84. No. 2. Pp. 243–252. (rus)
 35. *Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G.* Numerical investigation of Herschel-Bulkley fluids mixing. In: *IOP Conference Series: Materials and Engineering. Ser. 'International Scientific Conference of Young Researchers: Advanced Materials in Construction and Engineering'*. 2015. P. 012034.

Сведения об авторах

Матвиенко Олег Викторович, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Базуев Виктор Павлович, канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Сабьлина Наталья Романовна, магистрант, Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Асеева Алёна Евгеньевна, магистрант, Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Суртаева Анастасия Анатольевна, магистрант, Томский государственный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Authors Details

Oleg V. Matvienko, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia.

Viktor P. Bazuev, PhD, Senior Scientist, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

Natalya R. Sabylina, Undergraduate Student, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia.

Alyona E. Aseeva, Undergraduate Student, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia.

Anastasia A. Surtaeva, Undergraduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.