

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 665.455:006.354

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-151-168

О.В. МАТВИЕНКО^{1,2}, А.Е. ЛИТВИНОВА², Н.С. ФИРСАНОВА²,

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Томский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО, ОПИСЫВАЕМОГО МОДЕЛЬЮ КРОССА, В ТРУБЕ С ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ*

Аннотация. Проведено исследование течения полимерно-битумного вяжущего в трубе с внезапным расширением. При малых значениях параметра расширения в приосевой области формируется зона высоковязкого течения, в периферийной и пристеночной зонах происходит уменьшение эффективной вязкости. Процессы разрушения структурных связей, интенсивно протекающие в окрестности границы втекающей из подводящего патрубка струи, приводят к уменьшению эффективной вязкости. Формирование угловой зоны возвратных течений сопровождается ростом в ней значений эффективной вязкости.

Ключевые слова: реология, битумные вяжущие, вязкость, неньютоновские жидкости, модель Кросса

Для цитирования: Матвиенко О.В., Литвинова А.Е., Фирсанова Н.С. Исследование структуры течения полимерно-битумного вяжущего, описываемого моделью Кросса, в трубе с внезапным расширением // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 151–168.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-151-168

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90078.

O.V. MATVIENKO^{1,2}, A.E. LITVINOVA², N.S. FIRSANOVA²,

¹*Tomsk State University of Architecture and Building,*

²*National Research Tomsk State University*

THE CROSS MODEL OF LIQUID POLYMER-BITUMEN BINDER STRUCTURE IN A PIPE WITH SUDDEN EXPANSION

Abstract. The paper investigates the liquid polymer-bitumen binder in a pipe with a sudden expansion. At small values of the expansion parameter, the formation of a high-viscosity liquid zone occurs in the axial region, and the effective viscosity decreases at the periphery and near-wall zones. The destruction process of structural bonds, which intensively proceeds near the flow from the supply pipe, leads to a decrease in the effective viscosity. The formation of a corner area of reverse flows is accompanied by the increase in the effective viscosity.

Keywords: rheology, bituminous binder, viscosity, non-Newtonian fluid, Cross model

For citation: Matvienko O.V., Litvinova A.E., Firsanova N.S. Issledovanie struktury techeniya polimerno-bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu Krossa, v trube s vnezapnym rasshireniem [The Cross model of liquid polymer-bitumen binder structure in a pipe with sudden expansion]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 151–168.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-151-168

Введение

Потребность в производстве полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) связана с увеличением интенсивности движения и ростом нагрузок на дорожное покрытие, а также со специфическими условиями эксплуатации объектов дорожного строительства в различных климатических условиях [1].

Модифицирование дорожных битумов полимерами является одним из способов повышения их эксплуатационных свойств, в том числе снижения температуры хрупкости, расширения температурного интервала, повышения деформационной стабильности, долговечности и устойчивости к старению [2–5].

Многочисленные исследования показывают преимущество битумных вяжущих с добавлением стирол-бутадиен-стирольных полимеров (СБС-полимеров) над обычными нефтяными битумами [3, 6–8]. Если использовать в качестве модификатора битума СБС-полимер, эластичность дорожного покрытия многократно повышается и, как следствие, увеличивается срок службы. Добавление СБС-полимера повышает устойчивость покрытия к низким температурам, т. к. за счет гибкости модифицированного битума оно меньше подвергается «одревенению» во время зимних морозов. Покрытие с СБС-полимером отлично сопротивляется циклическим знакопеременным нагрузкам, адгезия его значительно выше, чем у обычного битума. Качественный СБС-полимер повышает теплоустойкость дорожного покрытия вплоть до 100 °С. Это свойство особенно важно в самые жаркие месяцы, когда солнце особенно активно.

Цикл теоретических исследований процессов течения и модифицирования битумных вяжущих в технологических устройствах проведен в работах [9–16].

Важнейшим элементом системы перекачки битумных вяжущих в процессе их модификации является трубопровод, который включает в себя

различные функциональные элементы: краны, затворы, клапаны, штуцеры, крестовины, переходники. Наличие перечисленных деталей часто приводит к формированию скачка сечения – участка резкого изменения площади проходного сечения в меньшую (сужение) или в большую (расширение) сторону [17].

Использование конструктивных элементов различного назначения, в том числе сужения и расширения, приводит к дополнительным потерям энергии за счет вынужденной перестройки потока при развитии соответствующей картины течения [18–20]. Для организации требуемого режима и создания условий течения с целью обеспечения эффективной транспортировки среды необходимы данные о влиянии геометрических особенностей трубопровода на формирование структуры потока, кинематические и динамические характеристики течения.

Вязкость полимерно-битумных вязущих

Вязкость битумных вязущих зависит от их коллоидной структуры, степени дисперсности, температуры, параметров течения и может сильно изменяться в технологическом процессе. Подробный обзор исследований, посвященных течениям реологически сложных сред, приведен в работах [3, 21–31].

Результаты исследований, представленные в научных статьях [1, 6, 7], показывают, что зависимость эффективной вязкости от сдвигового напряжения имеет три характерных режима течения. Эффективная вязкость в области низких скоростей деформации постоянна и представляет собой наибольшую вязкость вязущего при «нулевой» скорости сдвига μ_0 . Этот режим течения отвечает неразрушенной структуре полимерно-битумного вязущего. Это означает, что деформирование осуществляется с таким малым напряжением, что интенсивность процессов разрушения и восстановления структуры одинакова. Переходному режиму течения отвечают промежуточные скорости сдвига. Для этого режима течения характерно уменьшение эффективной вязкости вязущего с возрастанием скорости сдвига. С точки зрения реологии наличие этого режима объясняется тем, что скорость разрушения пространственной структуры превышает скорость её восстановления. Третий режим течения отвечает области предельно разрушенной структуры, когда процессы разрушения молекулярных связей в ПВБ гораздо интенсивнее, чем процессы восстановления. Вязкость, которая отвечает этому участку, называется вязкостью предельно разрушенной структуры (вязкостью при «бесконечной» скорости сдвига) μ_∞ .

При аппроксимации экспериментальных исследований течения ПВБ в качестве одной из наиболее универсальных моделей можно использовать реологическую модель Кросса [7, 32]:

$$\frac{\mu_0 - \mu_{eff}}{\mu_{eff} - \mu_\infty} = \left(\frac{U}{U_*} \right)^n, \quad (1)$$

где n – показатель нелинейности; U_* – скорость сдвига, при которой происходит резкое изменение вязкости. Параметры U_* и n принимаются постоянными для данной жидкости в некотором ограниченном диапазоне изменения скоростей сдвига. Они определяются из вискозиметрических опытов и анализа так называемых кривых течения.

Настоящая работа является продолжением исследований течения битумных вяжущих [33–37]. Целью работы является исследование структуры течения полимерно-битумного вяжущего, описываемого моделью Кросса, в цилиндрическом канале с внезапным расширением. При математическом моделировании предполагается, что ПБВ подается из подводящего патрубка радиусом r_{in} в трубы радиусом R и длиной L .

Математическая модель течения битумного вяжущего

Для описания поля течения используются двумерные осесимметричные уравнения реодинамики, описывающие баланс массы и количества движения [3, 31, 38–40]:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v r}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u v r}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau_{xr}}{\partial r}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v^2 r}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{xr}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau_{rr}}{\partial r} - \frac{\tau_{\varphi\varphi}}{r}. \quad (4)$$

Для полимерно-битумного вяжущего, описываемого моделью Кросса, реологические соотношения в случае осесимметричного течения имеют вид [32]:

$$\tau_{xx} = 2 \frac{\mu_0 U_*^n + \mu_\infty U^n}{U_*^n + U^n} \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{xr} = \frac{\mu_0 U_*^n + \mu_\infty U^n}{U_*^n + U^n} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{rr} = \frac{\mu_0 U_*^n + \mu_\infty U^n}{U_*^n + U^n} \frac{\partial v}{\partial r},$$

$$\tau_{\varphi\varphi} = 2 \frac{\mu_0 U_*^n + \mu_\infty U^n}{U_*^n + U^n} \frac{v}{r}, \quad (5)$$

$$U = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2. \quad (6)$$

На границах расчетной области задавались следующие условия [31, 41–43]:

$$x=0, \quad r \leq r_{in}: \quad u = u_{in} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad v=0;$$

$$x=L: \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad v=0;$$

$$r=0: \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad v=0;$$

$$0 \leq x \leq L, \quad r=R: \quad u=0, \quad v=0;$$

$$x=0, \quad r_{in} < r < R: \quad u=0, \quad v=0.$$

Величина u_{in} определяет скорость на оси течения на входе в канал. Для параболического распределения осевой скорости эта величина связана с объёмным расходом жидкости Q соотношением

$$u_{in} = 2 \frac{Q}{\pi r_{in}^2}.$$

Уравнения (2) – (4) решались численно с использованием метода конечного объема [44, 45].

Результаты математического моделирования

Перейдем к анализу полученных результатов. Диапазон изменения параметров был выбран следующим: вязкость вяжущего при «нулевой» скорости сдвига $\mu_0 = 105,6$ Па·с, вязкость при «бесконечной» скорости сдвига $\mu_\infty = 14,7$ Па·с, показатель нелинейности $n = 0,312$, характерная скорость сдвиговых деформаций $U_* = 1,59$ с⁻¹. Выбранный диапазон изменения параметров соответствует свойствам полимерно-битумных вяжущих, модифицированных СБС полимером [7]. Объёмный расход жидкости составлял $Q = 0,03$ м³/с, радиус канала $R = 0,1$ м, радиус подводящего патрубка варьировался в диапазоне $R = 0,02$ – $0,08$ м.

Рассмотрим сначала течение полимерно-битумного вяжущего в цилиндрической трубе постоянного сечения. При моделировании поля течения в трубе предполагалось, что распределение скоростей на входе в канал подчиняется закону Пуазейля, соответствующему установившемуся течению ньютоновской жидкости. Для неньютоновской жидкости на начальном участке течения происходит перестройка потока. В результате этой перестройки скорость потока в приосевой области увеличивается, а в пристеночной – уменьшается (рис. 1).

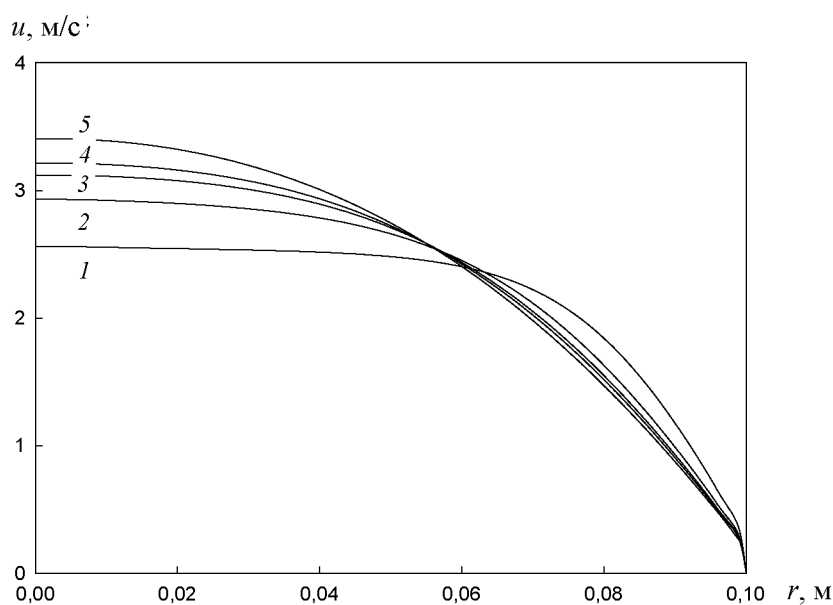


Рис. 1. Радиальное распределение осевой скорости u в трубе постоянного сечения:
1 – $x = 0,16$ м; 2 – $x = 0,36$ м; 3 – $x = 0,56$ м; 4 – $x = 0,76$ м; 5 – $x = 1,56$ м

Картину течения полимерно-битумного вяжущего показывают линии тока (рис. 2).

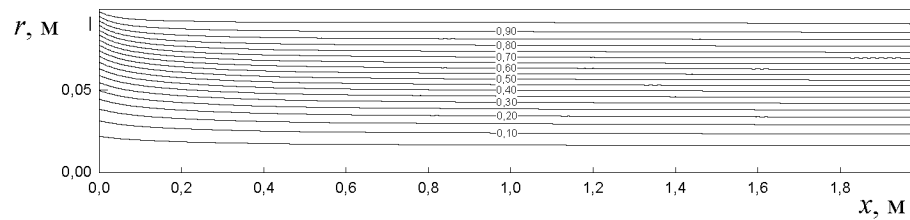


Рис. 2. Линии тока полимерно-битумного вяжущего в трубе постоянного сечения

На начальном участке течения заметно искривление линий тока, что связано с формированием гидродинамической стабилизации потока. Увеличение осевой скорости в центральной части течения происходит в результате оттока жидкости из пристеночной области в приосевую, и, как следствие этого, на начальном участке течения происходит смещение линий тока к оси канала. После гидродинамической стабилизации радиальное движение жидкости прекращается, и линии тока становятся параллельными оси.

Рассмотрим некоторые особенности радиального распределения эффективной вязкости при течении среды Кросса. Радиальные распределения эффективной вязкости μ_{eff} представлены на рис. 3. В приосевой зоне течения, где градиенты скорости имеют невысокие значения, заметно увеличение эффективной вязкости. В окрестности стенки, где градиенты скорости максимальны, происходит уменьшение эффективной вязкости. Значения эффективной вязкости в приосевой зоне увеличиваются вниз по потоку, при этом, по мере гидродинамической стабилизации, в приосевой области формируется зона высоковязкого течения, характерная для сред, обладающих псевдопластическими свойствами.

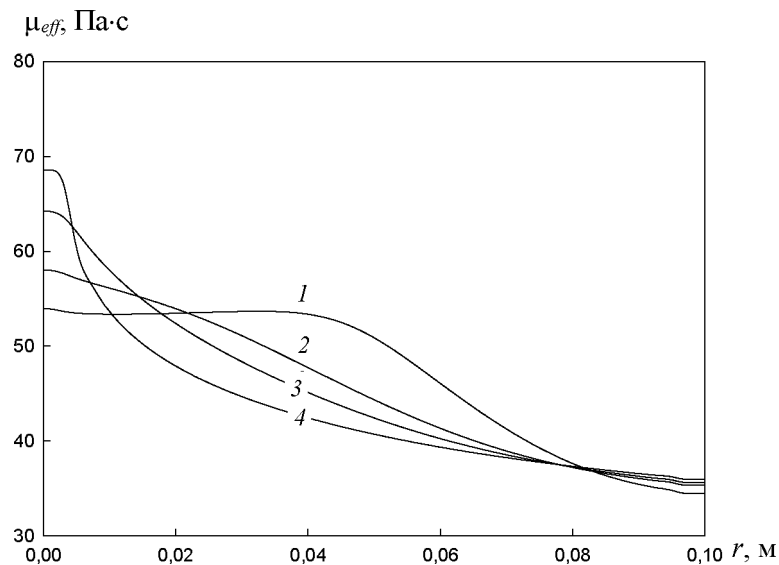


Рис. 3. Радиальное распределение эффективной вязкости μ_{eff} в трубе постоянного сечения:
1 – $x = 0,16$ м; 2 – $x = 0,36$ м; 3 – $x = 0,56$ м; 4 – $x = 1,56$ м

Распределение эффективной вязкости в потоке характеризуют изолинии вязкости, представленные на рис. 4.

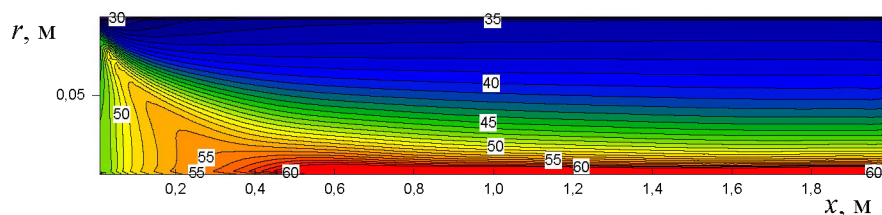


Рис. 4. Изолинии эффективной вязкости полимерно-битумного вязущего в трубе постоянного сечения $\eta = 0$

На начальном участке течения происходит увеличение эффективной вязкости в приосевой зоне. При этом область высоковязкого течения смещается к оси трубы. После гидродинамической стабилизации течения изолинии эффективной вязкости становятся параллельными оси течения. При этом максимальные значения вязкости наблюдаются вблизи оси течения, минимальные – около стенки.

Перейдем к анализу влияния скачка сечения на структуру течения полимерно-битумного вязущего. С этой целью было проведено исследование влияния степени расширения канала $\eta = (R - r_m)/R$ на параметры течения.

На рис. 5 показаны радиальные распределения осевой скорости в канале со скачком расширения.

При значениях параметра $\eta < 0,25$ влияние скачка сечения на структуру течения незначительно. Об этом свидетельствует близость кривых на рис. 1 и 5, а. В этом случае наблюдается незначительное расширение струи, втекающей в трубу из подводящего патрубка, и формирование застойной зоны в окрестности торцевой стенки.

С ростом значений η картина течения существенно изменяется. Поступающая в трубу из подводящего патрубка струя полимерно-битумного вязущего испытывает расширение, связанное с резким увеличением площади поперечного сечения. В результате этого радиус струи вниз по потоку увеличивается. На начальном участке течения в окрестности оси заметно выделяется потенциальное ядро. В периферийной области течения значения осевой скорости становятся отрицательными. Это свидетельствует о формировании угловой рециркуляционной зоны, связанной с резким расширением сечения. Абсолютные значения осевой скорости в рециркуляционной зоне вниз по потоку уменьшаются, и на значительном удалении от входа профиль осевой скорости становится монотонным.

Линии тока для различных значений параметра η приведены на рис. 6. Отчетливо видно наличие зоны возвратных течений в области, примыкающей к входному сечению в пространстве, ограниченном внешней границей струи торцевой и цилиндрической стенками. Как видно из рис. 6, с увеличением степени расширения канала (ростом η) происходит усиление рециркуляции в угловой зоне возвратных течений, а также увеличение размеров этой зоны.

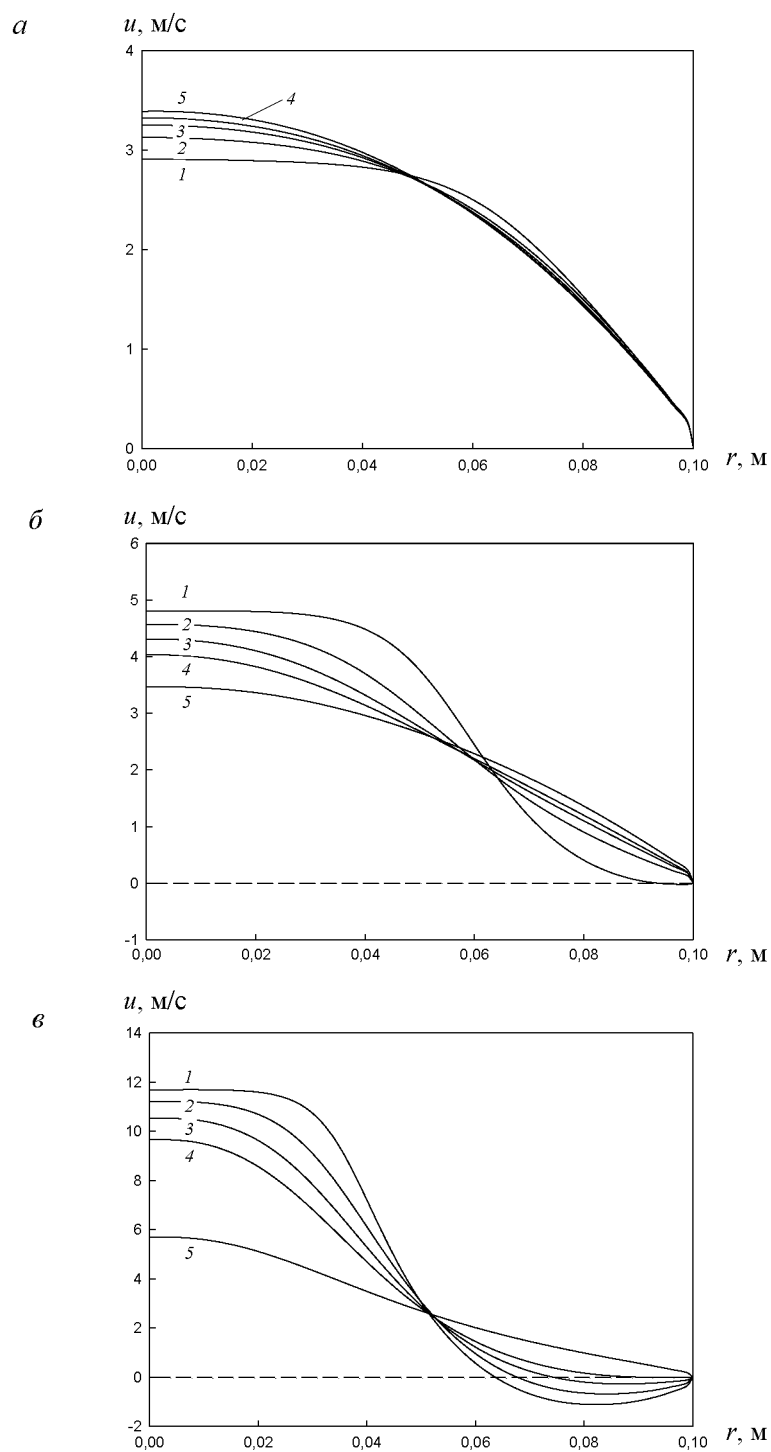


Рис. 5. Радиальное распределение осевой скорости u в трубе переменного сечения:
a – $\eta = 0,2$; *б* – $\eta = 0,4$; *в* – $\eta = 0,6$; 1 – $x = 0,16$ м; 2 – $x = 0,36$ м; 3 – $x = 0,56$ м; 4 –
 $x = 0,76$ м; 5 – $x = 1,56$ м

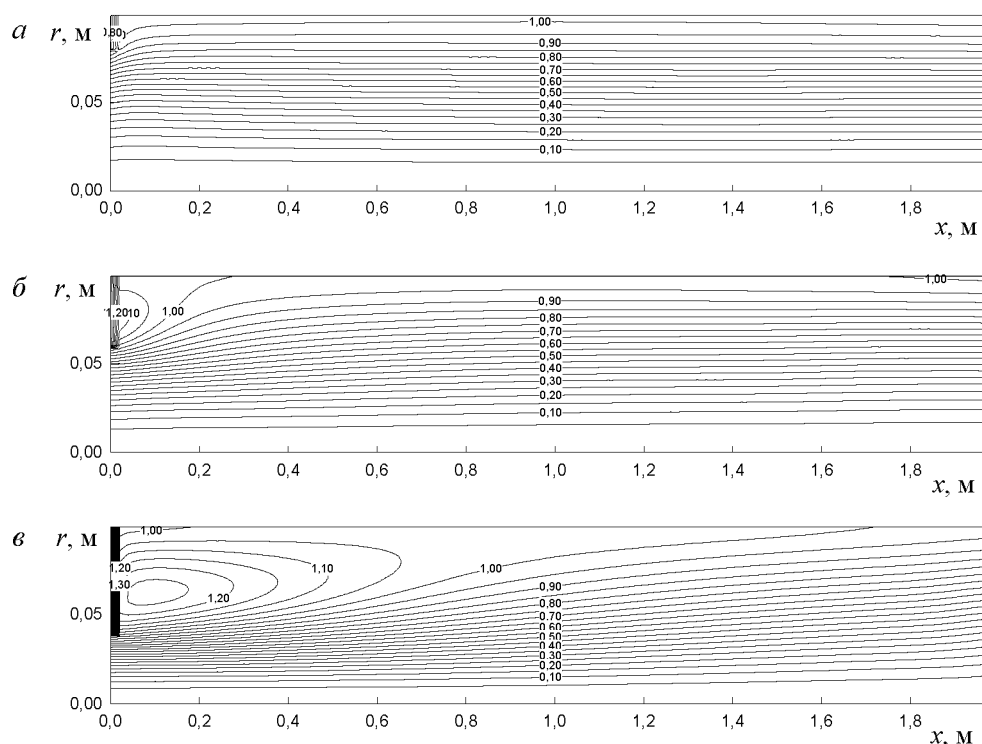


Рис. 6. Линии тока в трубе переменного сечения:

а – $\eta = 0,2$; б – $\eta = 0,4$; в – $\eta = 0,6$

Характерной особенностью полимерно-битумных вяжущих является существование структуры. В неподвижном состоянии модификатор образует непрерывную структуру, обладающую определенной прочностью. Эта структура сохраняется при малой величине приложенного напряжения. При втекании струи вяжущего из подводящего патрубка в цилиндрическую трубу на границе втекающей струи и угловой рециркуляционной (или застойной при малых η) зоны распределение скорости характеризуется значительными градиентами, а следовательно, и большими сдвиговыми напряжениями. Таким образом, с увеличением степени расширения канала η интенсифицируются процессы разрушения структуры среды.

На рис. 7 показано распределение эффективной вязкости потока в трубе со скачком сечения. В результате разрушения структурных связей при больших значениях η происходит уменьшение значений эффективной вязкости в потоке. Ширина приосевой зоны высоковязкого течения, а также максимальное значение вязкости в этой зоне уменьшаются с ростом η . При этом основная часть течения, за исключением узкой приосевой и рециркуляционной зон, характеризуется невысокими значениями вязкости. В центре рециркуляционной зоны, в области незначительных скоростей сдвиговых деформаций, величина эффективной вязкости принимает высокие значения. Таким образом, формирование зоны возвратных течений сопровождается ростом эффективной вязкости в этой зоне.

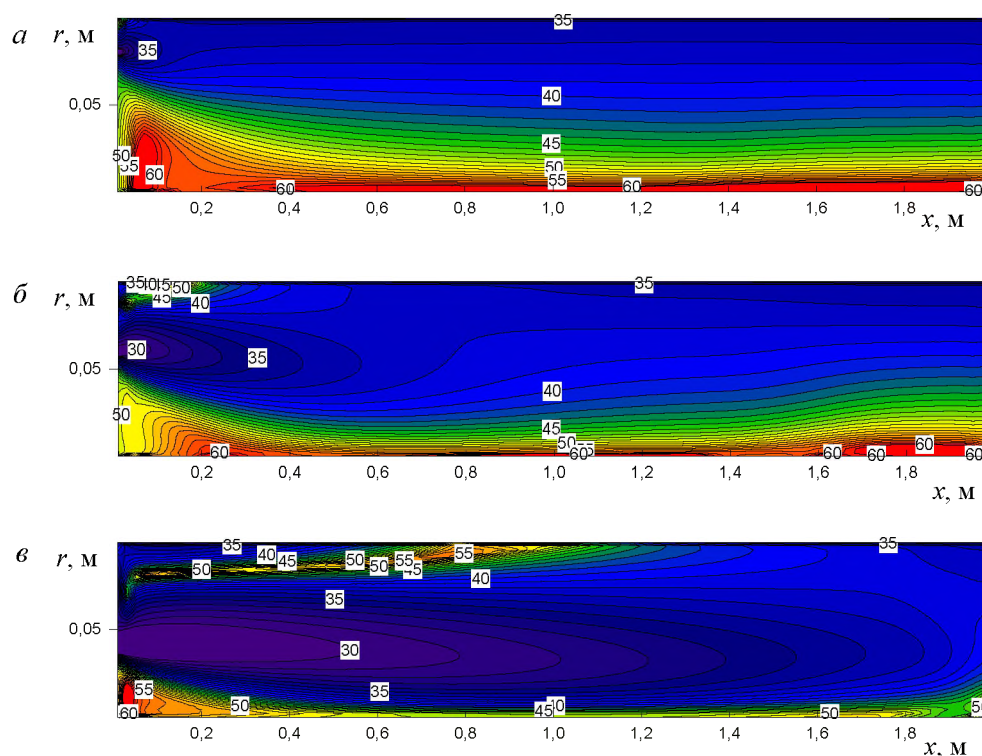


Рис. 7. Изолинии эффективной вязкости в трубе переменного сечения:

$a - \eta = 0,2$; $b - \eta = 0,4$; $v - \eta = 0,6$

Радиальные распределения эффективной вязкости в трубе переменного сечения представлены на рис. 8.

При малых значениях параметра расширения ($\eta < 0,25$) радиальное распределение эффективной вязкости аналогично течению в трубе постоянного сечения (рис. 8, a). В приосевой области формируется зона высоковязкого течения, при этом изменение вязкости в этой зоне является несущественным. В периферийной и пристеночной зонах в результате увеличения сдвиговых напряжений происходит ослабление структурных связей и уменьшение эффективной вязкости.

При $\eta > 0,25$ структура течения характеризуется наличием угловой зоны возвратных течений. В этом случае радиальное распределение эффективной вязкости принимает более сложный вид (рис. 8, b, v). В приосевой области незначительных сдвиговых напряжений радиальное распределение эффективной вязкости характеризуется наличием плато с высокими значениями μ_{eff} . В окрестности границы втекающей из подводящего патрубка струи сдвиговые напряжения максимальны, и, как следствие этого, в этой области наиболее интенсивно происходят процессы разрушения структурных связей, приводящие к уменьшению эффективной вязкости. По мере приближения к зоне возвратных течений сдвиговые напряжения уменьшаются, и, соответственно, наблюдается рост μ_{eff} .

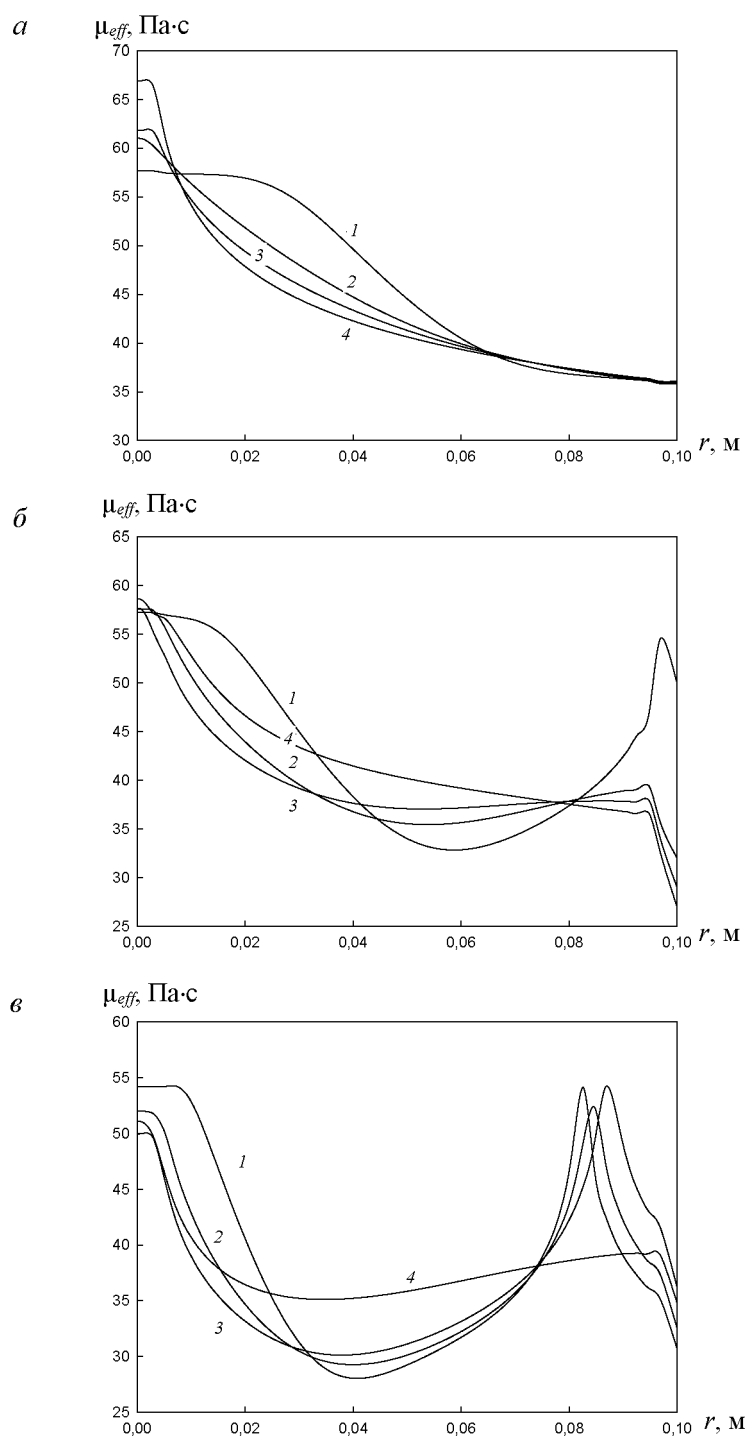


Рис. 8. Радиальное распределение осевой скорости μ_{eff} в трубе переменного сечения:

$\alpha - \eta = 0,2$; $\delta - \eta = 0,4$; $\varepsilon - \eta = 0,6$; $1 - x = 0,16$ м; $2 - x = 0,36$ м; $3 - x = 0,56$ м; $4 - x = 1,56$ м

В непосредственной близости от стенки сдвиговые напряжения вновь увеличиваются, а эффективная вязкость уменьшается. Увеличение μ_{eff} в рециркуляционной зоне определяется интенсивностью рециркуляции в ней, которая, в свою очередь, зависит от степени расширения канала η . Таким образом, с ростом η происходит увеличение значений μ_{eff} в рециркуляционной зоне.

Отметим, что влияние расширения канала η на структуру течения сказывается на гидродинамически нестабилизированном участке течения. Длина этого участка для рассматриваемых расходных характеристиках примерно равна $L_* = 20R$. На больших длинах ($L_* < x$) течение гидродинамически стабилизируется, при этом особенности ввода потока в трубу не влияют на структуру течения.

Заключение

В ходе выполнения работы исследована структура течения полимерно-битумного вяжущего в трубе с внезапным расширением и получены следующие результаты:

- при малых значениях параметра расширения ($\eta < 0,25$) в приосевой области формируется зона высоковязкого течения, в периферийной и пристеночной зонах в результате увеличения сдвиговых напряжений происходит уменьшение эффективной вязкости;
- в окрестности границы втекающей из подводящего патрубка струи интенсивно происходят процессы разрушения структурных связей, приводящие к уменьшению эффективной вязкости;
- в рециркуляционной зоне, в области незначительных скоростей сдвиговых деформаций, происходит рост значений эффективной вязкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Базаров Р.Б., Арутюнян Э.Р. Математическое моделирование сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4 (63). С. 158–170.
2. Бабак О.Г., Старков Г.Б. Применение модифицированных вяжущих в дорожном строительстве // Дорожная техника и технологии. 2001. № 5. С. 72–75.
3. Галдина В.Д. Модифицированные битумы. Омск : СибАДИ, 2009. 228 с.
4. Матвиенко О.В., Унгер Ф.Г., Базуев В.П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2015.
5. Polacco G., Filippi S., Merusi F., Stastna G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility // Adv. Colloid Interface Sci. 2015. V. 224. P. 72–112.
6. Русаков М.Н., Исмаилов А.М. Стирол-бутадиен-стирольные полимеры для автодорожного строительства в Российской Федерации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2020. № 87. DOI: 10.18720/CUBS.87.3
7. Sybilski D. Non-newtonian viscosity of polymer-modified bitumens // Materials and Structures 1993. V. 26. P. 15–23. DOI: 10.1007/BF02472233
8. Gabriela C.C., Glicerio T., Joao V.S.M., Matheus F.M., Liseane P.T., Lidia C.L. Evaluation of rheological behavior, resistance to permanent deformation and resistance to fatigue of asphalt

- mixtures modified with nanoclay and SBS polymer // Applied sciences. 2019. № 9. P. 1–16. DOI: 10.3390/app9132697
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Garcia E.J., Steffe J.F. Comparison of friction factor equations for non-Newtonian fluids in pipe flow // J. Food Process Eng. 1986. V. 9. № 2. P. 93–120.
18. Benedict R.P., Carlucci N.A., Swetz S.D. Flow losses in abrupt enlargements and contractions // J. Eng. Power. 1966. V. 88. № 1. P. 73–81.
19. Abdelall F.F. Pressure drop caused by abrupt flow area changes in small channels // Exp. Therm. Fluid Sci. 2005. V. 29. № 4. P. 425–434.
20. Рыльцев И.А., Рыльцева К.Е., Шрагер Г.Р. Кинематика течения степенной жидкости в трубе переменного сечения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 63. С. 125–138.
21. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Сабылина Н.Р., Асеева А.Е., Суртаева А.А. Исследование установившегося течения вязкопластического битумного вязущего, описываемого моделью Шведова – Бингама, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 158–177.
22. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Черкасов И.С., Асеева А.Е., Веник В.Н. Течение битумного вязущего, описываемого моделью Оствальда – де Вейля, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 171–192.
23. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Черкасов И.С., Литвинова А.Е. Исследование гидравлических характеристик потока водно-песчаной суспензии в трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 129–144.
24. 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.
25. Матвиенко О.В., Литвинова А.Е. Исследование установившегося течения высокопарафинистого битумного вязущего, описываемого моделью Балкли – Гершеля, в цилиндри-

- ческой трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 79–99.
26. Матвиенко О.В., Литвинова А.Е., Фирсанова Н.С. Исследование расходных характеристик установившегося течения высокопарафинистого битумного вязущего в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 5. С. 71–85.
27. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. Санкт-Петербург : Профессия, 2007. 560 с.
28. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. Москва : Мир, 1964. 216 с.
29. Кутепов А.М., Полянин Л.Д., Запьянов З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А. Химическая гидродинамика : справочное пособие. Москва : Бюро Квантум, 1996. 336 с.
30. Климов Д.М., Петров А.Г., Георгиевский Д.В. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость и перемешивание. Москва : Наука, 2005. 394 с.
31. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва : Наука, 1987. 824 с.
32. Cross M.M. Rheology of non-Newtonian fluids: a new flow equation for pseudoplastic systems // J. Colloid. Sci. 1965. V. 20. P. 417–437.
33. 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.
34. Матвиенко О.В. Численное исследование течения неньютоновских жидкостей в цилиндрическом канале // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 8-2. С. 183–189.
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. Сер. «International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering, TSUAB 2014». 2015. 012034.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Москва : Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
45. Van Doormal J.P., Raithby G.D. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows // Numerical Heat Transfer. 1984. V. 7. P. 147–163.

REFERENCES

1. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Bazarov R.B., Arutyunyan E.R. Matematicheskoye modelirovaniye sdvigoustoychivosti asfal'tobetonnykh pokrytiy avtomobil'nykh dorog [Mathematical modelling of road pavement shear-resistance]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 4 (63). Pp. 158–170. (rus)
2. 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. Pp. 72–75. (rus)
3. Galdina V.D. Modifitsirovannyye bitumy [Modified bitumen]. Omsk: SibADI, 2009. 228 p. (rus)
4. Matvienko O.V., Unger F.G., Bazuev V.P. Matematicheskiye modeli proizvodstvennykh protsessov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [Mathematical models of manufacturing processes for preparation of dispersed bitumen systems]. Tomsk: TSUAB, 2015. (rus)
5. Polacco G., Filippi S., Merusi F., Stastna G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2015. V. 224. Pp. 72–112.
6. Rusakov M.N., Ismailov A.M. Stirol-butadiyen-stirol'nyye polimery dlya avtodorozhnogo stroitel'stva v Rossiyskoy Federatsii. [Styrene-butadiene-styrene polymers for road construction in the Russian Federation]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2020. No. 87. DOI: 10.18720/CUBS.87.3 (rus)
7. Sybilski D. Non-Newtonian viscosity of polymer-modified bitumen. *Materials and Structures*. 1993. V. 26. Pp. 15–23. DOI:10.1007/BF02472233
8. Gabriela C.C., Glicerio T., Joao V.S.M., Matheus F.M., Liseane P.T., Lidia C.L. Evaluation of rheological behavior, resistance to permanent deformation and resistance to fatigue of asphalt mixtures modified with nano-clay and SBS polymer. *Applied Sciences*. 2019. No. 9. Pp. 1–16. DOI: 10.3390/app9132697
9. 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)
10. Matvienko O.V., Agafontseva M.V., Bazuev V.P. Issledovaniye dinamiki puzyr'ka v zakruchennom potoke nelineynno-vyazkoy zhidkosti. [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)
11. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Eksperimental'noye issledovaniye protsesssa kavitatsii v tekhnologicheskikh ustroystvakh. [Experimental study of cavitation process using technological devices]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. P. 165–176. (rus)
12. Matvienko O.V., Efa A.K., Bazuev V.P., Evtyushkin E.V. Chislennoye modelirovaniye raspada turbulentnoy strui v sputnom zakruchennom potoke. [Numerical modeling of turbulent jet decay in wake swirling flow]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2006. V. 49. No. 6. Pp. 96–107. (rus)
13. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Turkasova N.G., Baygulova A.I. Issledovaniye protsesssa modifikatsii bituma v inzhektornom smesitele. [Bitumen modification in injector mixer]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 3. Pp. 202–213. (rus)
14. Bazuev V.P., Matvienko O.V., Voronenko V.L. Modelirovaniye protsesssa modifitsirovaniya bituma v kavitatsionno-smesitel'nom dispergatore. [Modeling of bitumen modification in cavitation mixing disperser]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010. No. 4. Pp. 121–128. (rus)
15. 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 [Mixing coaxial swirl flows for preparation of dispersed bitumen systems]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 3 (44). Pp. 123–134. (rus)
16. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Chislennoye issledovaniye protsesssa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyr'kov v smesitel'nom ustroystve [Numerical calculation of

- cavitation bubble formation in a mixing device]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 4 (45). Pp. 231–245. (rus)
17. Garcia E.J., Steffe J.F. Comparison of friction factor equations for non-Newtonian fluids in pipe flow. *Journal of Food Process Engineering*. 1986. V. 9. No. 2. Pp. 93–120.
 18. Benedict R.P., Carlucci N.A., Swetz S.D. Flow losses in abrupt enlargements and contractions. *Journal of Engineering for Power*. 1966. V. 88. No. 1. Pp. 73–81.
 19. Abdelall F.F. Pressure drop caused by abrupt flow area changes in small channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2005. V. 29. No. 4. Pp. 425–434.
 20. Ryltsev I.A., Ryltseva K.E., Shrager G.R. Kinematika techeniya stepennoy zhidkosti v trube peremennogo secheniya [Kinematics of power-law fluid flow in a pipe with varying cross section]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2020. V. 63. Pp. 125–138. (rus)
 21. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Sabylina N.R., Aseeva A.E., Surtaeva A.A. Issledovanie ustanovivshegosya techeniya vyazkoplasticheskogo bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu Shvedova–Bingama, v tsilindricheskoi trube [Shvedov-Bingham model of steady flow of visco-plastic bitumen binder in cylindrical tube]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 3. Pp. 158–177. (rus)
 22. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Litvinova A.E. Techenie bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu ostval'da – de veilya, v tsilindricheskoi trube [Liquid asphalt binders in cylindrical tube in terms of the Ostwald-de Waele model]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 129–144. (rus)
 23. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Aseeva A.E. Issledovanie gidravlicheskiy kharakteristik potoka vodno-peschanoy suspensii v trube [Hydraulic properties of sand slurry flow in a pipe]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 2. Pp. 171–192. (rus)
 24. Matvienko O.V. Issledovaniye ustanovivshegosya techeniya psevdoplasticheskoy zhidkosti, opisyvayemoy model'yu Sisko, v tsilindricheskoy trube [Sisco model of steady state flow of pseudoplastic fluid in a cylindrical tube]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2018. No. 55. Pp. 99–112. (rus)
 25. Matvienko O.V., Litvinova A.E. Issledovanie ustanovivshegosya techeniya vysokoparafinistogo bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu balkli – gershelya, v tsilindricheskoi trube [Steady flow of high-paraffin bituminous binder in cylindrical tube in terms of Herschel-Bulkley fluid]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 79–99. (rus)
 26. Matvienko O.V., Litvinova A.E., Firsanov N.S. Issledovanie raskhodnykh kharakteristik ustanovivshegosya techeniya vysokoparafinistogo bitumnogo vyazhushchego v tsilindricheskoi trube [Stabilized flow rate of high-paraffin asphalt cement in cylindrical pipe]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021. V. 23. No. 5. Pp. 71–85. (rus)
 27. Malkin A.Y., Isaev A.I. Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya [Rheology: Concepts, methods, applications]. Saint-Petersburg: Professia, 2007. 560 p. (rus)
 28. Wilkinson W.L. Nen'yutonovskie zhidkosti [Non-Newtonian fluids]. Moscow: Mir, 1964. (transl. from Engl.)
 29. Kutepov A.M., Polyani L.D., Zapryanov Z.D., Vyaz'min A.V., Kazenin D.A. Khimicheskaya gidrodinamika [Chemical hydro-dynamics]. Moscow: Bureau Quantum, 1996. (rus)
 30. Klimov D.M., Petrov A.G., Georgievsky D.V. Vyazkoplasticheskiye techeniya: dinamicheskiy kaos, ustoychivost' i peremeshivaniye [Viscoplastic flows: Dynamic chaos, stability and mixing]. Moscow: Nauka, 2005. (rus)
 31. Loitsyansky L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of liquid and gas]. Moscow: Nauka, 1974. (rus)
 32. Cross M.M. Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1965. V. 20. Pp. 417–437.
 33. 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 calculation of flow structure and heat transfer for swirling flow of bitumen dispersed systems in cylindrical channels]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2 (43). P. 80–93. (rus)
34. Matvienko O.V. Chislennoye issledovaniye techeniya nen'yutonovskikh zhidkostey v tsilindricheskom kanale. [Numerical investigation of the flow of non-Newtonian fluids in a cylindrical channel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2014. V. 57. No. 8-2. Pp. 183–189. (rus)
 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*. 2015. 012034.
 36. 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 number]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2014. V. 87. No. 4. Pp. 908–918. (rus)
 37. Matvienko O.V., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye zakruchennogo potoka termovyazkoy psevdoplasticheskoy zhidkosti Sisko v tsilindricheskom kanale [Mathematical simulation of swirling flow of thermal viscous, pseudoplastic Sisco fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2020. V. 93. No. 4. Pp. 827–838. (rus)
 38. Matvienko O.V., Evtushkin E.V. Matematicheskoye issledovaniye separatsii dispersnoy fazy v gidrotsiklone pri oчитке vyazkoplasticheskikh burovnykh rastvorov [Mathematical investigation of dispersed phase separation in hydrocyclone during viscoplastic mud cleaning]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2011. V. 84. No. 2. Pp. 243–252. (rus)
 39. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dulzon N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka vyazkoplasticheskoy 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)
 40. 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 pseudoplastic Bulkley–Herschel fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2019. V. 92. No. 1. Pp. 215–226. (rus)
 41. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka dilatantnoy zhidkosti Balkli–Gershelya v tsilindricheskom kanale [Mathematical simulation of swirling flow of dilatant Bulkley–Herschel fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2019. V. 92. No. 6. Pp. 2641–2651. (rus)
 42. 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)
 43. 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)
 44. Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teplomassoobmena i dinamiki zhidosti [Numerical simulation of heat and mass transfer and fluid dynamics]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. (rus)
 45. Van Doormal J.P., Raithby G.D. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows. *Numerical Heat Transfer*. 1984. V. 7. Pp. 147–163.

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, matvolegv@mail.ru

Литвинова Алёна Евгеньевна, аспирант, Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, alena.aseeva.93@mail.ru

Фирсанова Наталья Сергеевна, аспирант, Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, firmataliya@yandex.ru

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, matvolegv@mail.ru

Alyona E. Litvinova, Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, alena.aseeva.93@mail.ru

Nataliya S. Firsanova, Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, firmataliya@yandex.ru