

9. Турский Ю.И. Очистка производственных сточных вод: учебник / Ю.И. Турский, И.В. Филиппов. – Ленинград : Химия, 1967. – 327 с.
10. Якимова Т.И. Исследование адсорбции растворенных веществ промышленными АУ / Т.И. Якимова, А.В. Мамченко, А.М. Когановский // Химия и технология воды. – 1978. – № 1. – С. 26.
11. Adsorption: progress in fundamental and application research: selected reports at the 4th pacific basic conference on absorption science and technology// World scientific Publishing company incorporated, 2007. – 281 p.
12. Исследование взаимосвязи между физико-химическими свойствами промышленных сточных вод и методами их очистки / Е.В. Москвичева, А.В. Москвичева, Д.О. Игнаткина, П.А. Сидякин, Д.В. Щитов, Т.А. Кузьмина // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15865>.
13. Jisti D.M. Activated Carbon Adsorption of Petrochemicals /D.M. Jisti, R.A. Conway // J. Water Poll. Control fed. – 1974. – V. 46. – P. 947.
14. Zuckerman M.M. Activated Carbon Adsorption of organic from Aqueous Phase / M.M. Zuckerman, A.H. Molof // Water Poll. Control fed. – 1970. – V. 42. – P. 43
15. Пат. 2644880 Российская Федерация, МПК МПК: В01J 20/24 (2006.01) Способ получения сорбента для очистки сточных вод от многокомпонентных загрязнений / Д.О. Игнаткина [и др.]; ВолгГТУ. – № 2017108520; заявл. 14.03.2017; опубл. 14.02.2018, Бюл. № 5. – 10 с.
16. Технология получения гранулированного сорбционно-фильтрующего композитного материала на основе отхода производства (на примере предприятия табачной индустрии РФ) / Д.О. Игнаткина [и др.] // Вестн. Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архитектура. – 2017. – Вып. 49 (68) – С. 110–121.
17. Игнаткина Д.О. Composite Sorbent Filter Material on the Basis of Man-Caused and Minerals / Д.О. Игнаткина, Е.В. Москвичева, А.А. Войтюк // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – P. 983–987. – URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945>.
18. Ignatkina D.O. Razrabotka tehnologii ochistki mnogokomponentnyh stochnyh vod predpriyatija tabachnoj promyshlennosti: avtoref...dis.kand.teh.nauk. Penza, 2019, 24 s.
19. Matematicheskoe opisanie jeksperimental'nyh zakonornostej processa sorbcionnoj doochistki stochnyh vod na primere predpriyatija tabachnoj industrii RF / D.O. Ignatkina, A.P. Pozdnjakov, A.V. Moskvicheva, E.V. Moskvicheva, A.A. Vojtjuk // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2019. – № 4 (77). – 110–121.
20. Постановление Администрации Волгограда от 18 июня 2015 г. № 840 «Об утверждении нормативов водоотведения (сброса) по составу и свойствам сточных вод, отводимых в окружающую природную среду через централизованные системы водоотведения Волгограда». – Режим доступа: <http://www.garant.ru/hotlaw/volga/633238/>.

© Д.О. Игнаткина, А.А. Войтюк, А.А. Геращенко, В.И. Салеева

Ссылка для цитирования:

Д.О. Игнаткина, А.А. Войтюк, А.А. Геращенко, В.И. Салеева. Экспериментальная оценка эффективности адсорбции многокомпонентных загрязнений с использованием органобentonитового сорбента // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2020. № 4 (34). С. 28–33.

УДК 539.4.01

УЧЕТ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ИЗГИБАЕМОГО БРУСА В ИНКРЕМЕНТАЛЬНОМ УСЛОВИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова, С.А. Калиновский

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

Рассмотрено включение в условие пластичности коэффициента, учитывающего форму поперечного сечения. При неоднородном распределении напряжений повышенные градиентные напряжения, отвечающие началу текучести, оказываются отличающимися для разных форм сечения. Проведена сравнительная оценка градиентного эффекта для симметричных прокатных профилей.

Ключевые слова: *условие пластичности, градиент напряжений, форма сечения.*

TAKING INTO ACCOUNT THE SHAPE OF THE CROSS SECTION OF THE BENT BEAM IN THE INCREMENTAL CONDITION OF PLASTICITY

S. Yu. Kalashnikov, E.V. Gurova, S.A. Kalinovsky

Volgograd state technical University, Volgograd, Russia

The inclusion of a coefficient that takes into account the shape of the cross-section in the plasticity condition is considered. When the stress distribution is inhomogeneous, the increased gradient stresses corresponding to the beginning of yield are different for different cross-section shapes. A comparative assessment of the gradient effect for symmetrical rolling profiles is carried out.

Key words: *condition of plasticity, stress gradient, the shape of the cross section.*

В строительном комплексе задача снижения материалоемкости при одновременном обеспечении параметров механической безопасности в соответствии с требованиями нормативных до-

кументов является важнейшей. Одним из элементов системы обеспечения параметров безопасной эксплуатации является оценка разрешаемого предельного состояния. Например, для металлических конструкций таким состоянием

является наступление пластических деформаций в опасном сечении. Такой этап деформирования нормируется достижением максимального напряжения величины, меньшей расчетного сопротивления материала и является по сути реализацией условия пластичности. Расчетные модели, заложенные в нормативную документацию, базируются на математически аппроксимированных диаграммах деформирования, полученных опытным путем при испытании образцов на одноосное растяжение. Из анализа экспериментальных данных [1–5] следует, что предел текучести материала, определенный из опытов на растяжение (то есть однородное напряженное состояние) не позволяет достоверно решать задачи прочности при неоднородном распределении напряжений. Ранее авторами были предложены инкрементальные условия пластичности, устанавливающие момент начала текучести при неоднородном напряженном состоянии. Они применимы к однородному изотропному материалу, обладающему площадкой текучести [6–9]. Критерий учитывает стеснение деформаций сдвига по площадкам скольжения в областях с градиентами напряжений, что приводит к эффекту повышения предельных упругих напряжений. Математически условия записываются в форме критериев Треска или Мизеса, но начало текучести определяется этапом, когда максимальное напряжение в опасной точке достигнет некоторого повышенного значения, большего предела текучести материала. Это увеличение будет тем больше, чем более неоднородным является распределение напряжений в окрестностях рассматриваемой точки. В то же время, оно не может быть безграничным, поэтому предлагается асимптотическая зависимость, записанная в интенсивностях касательных напряжений, для его представления:

$$T_{gr} = T_0 + (T_m - T_0) \frac{g}{\lambda_{T,g} + g}, \quad (1)$$

где $g = grad T / T$ есть мера неоднородности напряженного состояния; T_m – наибольшее из напряжений, возможных при неоднородном напряженном состоянии, которое для приведенной зависимости принимается равным 1,5 от предела текучести T_0 ; $\lambda_{T,g}$ – упругая характеристика материала с размерностью, обратной длине. В [9, 10] из экспериментальных данных [2] для строительной стали получено $\lambda_{T,g} = 20,1587 \text{ м}^{-1}$.

Предложенный градиентный подход реализован в решении задач прочности при изгибе [9, 10, 11] и внецентренном сжатии [11] стержней. Например, при чистом изгибе бруса прямоугольного поперечного сечения неоднородное напряженное состояние

$$\sigma_x = M \cdot y / J_x, \quad \sigma_y = \tau_{xy} = 0$$

определяет

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_x;$$

$$grad T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$$

и для крайних точек сечения при $y = \frac{h}{2}$ из (1) получим

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} - 1 \right) \frac{2/h}{\lambda_{T,g} + 2/h} \right], \quad (2)$$

при $\sigma_m = 1,5\sigma_0$ окончательно сводящееся к выражению

$$\sigma_{gr} = \frac{20,1587h+3}{20,1587h+2}, \quad (3)$$

При одинаковой высоте для различных форм поперечного сечения объем упругодеформированного материала, прилегающего к крайнему волокну, различен, поэтому стеснение деформаций будет проявляться в различной степени. В наибольшей степени градиентный эффект будет проявляться при сосредоточении материала у нейтральной оси. В [6, 12] для учета этого эффекта предлагается интегральная характеристика – коэффициент формы, представляющий собой отношение внутренней силы, воспринимаемой сечением при равномерном распределении напряжений к внутренней силе в этом сечении при изгибе, что определяет для прямоугольного поперечного сечения $k_\phi^{пр} = 2$, для круглого поперечного сечения $k_\phi^{круг} = 3\pi/4$ и т. п.

Зависимость величины фибрового напряжения от формы поперечного сечения предлагается учесть введением в зависимость (1) или (2) приведенного коэффициента $\sqrt[3]{\frac{k_\phi}{k_\phi^{пр}}}$ при σ_m , соотносящегося с характерным размером прямоугольного сечения h . При этом (2) после преобразований приобретает вид

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 \frac{\lambda_{T,g} h + 3 \sqrt[3]{\frac{k_\phi}{k_\phi^{пр}}}}{\lambda_{T,g} h + 2} = \sigma_0 \frac{\lambda_{T,g} h + 2,38 \sqrt[3]{\frac{k_\phi}{k_\phi^{пр}}}}{\lambda_{T,g} h + 2}. \quad (4)$$

Для сечения в виде двутавра коэффициент формы из табл. 2.1 [12]

$$k_\phi^{двутавр} = \frac{h\delta(b-c) + \frac{ch^2}{2}}{(h\delta - \delta^2)(b-c) + \frac{ch^2}{4}},$$

где b – ширина полки, c – толщина стенки, δ – толщина полки.

Для трубы радиусом R с толщиной стенки δ

$$k_\phi^{труба} = \frac{3\pi}{4} \cdot \frac{2R^2 - \delta R}{3R^2 - 3R\delta + \delta^2}.$$

Для вычисления коэффициента формы принимаем существующие размеры профилей по ГОСТ 8734–75 «Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. Сортамент» и по ГОСТ 8239–89 «Двутавры стальные горячекатаные», значения которых для некоторых размеров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Численные значения коэффициентов формы для некоторых прокатных профилей

профиль \ высота поперечного сечения h , м		0,03	0,05	0,06	0,1	0,2	0,3	0,4
		0,03	0,05	0,06	0,1	0,2	0,3	0,4
прямоугольный		2	2	2	2	2	2	2
двутавр		-	-	-	1,308	1,287	1,303	1,333
труба тонкостенная	на границе особотонкостенных	1,613	1,616	1,611	1,611	1,611	-	-
	на границе толстостенных	1,680	1,703	1,694	1,686	1,721	-	-

Анализ численных значений показывает, что у прокатных профилей величина коэффициента формы в сравнении с прямоугольным поперечным сечением меньше и составляет у двутавра 1,3, у труб с тонкой стенкой 1,6, а с толстой стенкой – 1,7, значит поддерживающий эффект бу-

дет сказываться в меньшей степени. Это подтверждается величинами градиентных напряжений, вычисленных по (4) и отвечающих началу текучести в фибровом волокне, что приведено в табл. 2 и графически показано на рис. 1.

Таблица 2

Значения увеличения σ_{gr}/σ_0 для различных сечений с учетом коэффициента формы

профиль \ высота поперечного сечения h , м		0,03	0,05	0,06	0,1	0,2	0,3	0,4
		0,03	0,05	0,06	0,1	0,2	0,3	0,4
прямоугольный		1,384	1,333	1,311	1,249	1,166	1,124	1,099
двутавр		-	-	-	1,15	1,098	1,075	1,062
труба тонкостенная	на границе особотонкостенных	1,304	1,264	1,246	1,197	1,131	-	-
	на границе толстостенных	1,319	1,280	1,261	1,208	1,141	-	-

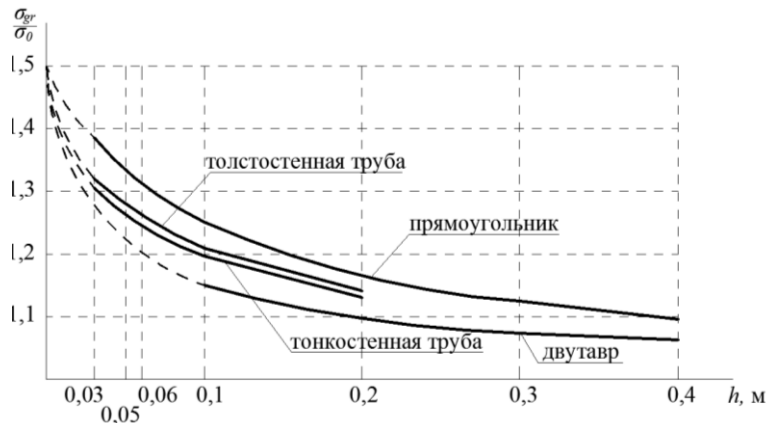


Рис. 1. Графики зависимости градиентного напряжения от высоты поперечного сечения с учетом коэффициента формы

Кроме дробно-линейной функции для аппроксимации эффекта стеснения могут быть использованы иные алгебраические выражения. В [13, 14] показана возможность применения в различных пределах иррациональной, показательной, тригонометрических и логарифмических кривых. Далее остановимся на тех, которые представляются наиболее перспективными для применения.

Иррациональная зависимость

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 [1 + \lambda_{ир} \sqrt[n]{g}], \text{ где } n \geq 3$$

с учетом приведенного коэффициента $\sqrt[3]{\frac{k_{\phi}}{k_{пр}}}$ перед характеристикой $\lambda_{ир} = 0,1304 [\text{м}^{-1}]^{-\frac{1}{4}}$ (вычислено по экспериментальным данным [2]) при $n=4$ в нашем случае приобретает вид

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 (1 + 0,1231 \sqrt[4]{1/h} \cdot \sqrt[3]{k_{\phi}}). \quad (5)$$

Логарифмическая функция

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 \left(1 + a \cdot \log \left(\frac{\lambda_{лог} + g}{\lambda_{лог}} \right) \right)$$

в зависимости от основания логарифма будет иметь различные значения коэффициента «а» и характеристики $\lambda_{лог}$, размерностью $[\text{м}^{-1}]$. При

использовании экспериментальных данных [2] для десятичного логарифма имеем

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 \left(1 + 0,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{k_{\phi}}{k_{\phi}^{np}}} \cdot \lg \frac{0,9297+2/h}{0,9297} \right),$$

что окончательно дает расчетную формулу

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 \left(1 + 0,1587 \cdot \sqrt[3]{k_{\phi}} \cdot \lg \frac{0,9297h+2}{0,9297h} \right). \quad (6)$$

При использовании основания натурального логарифма

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt[3]{\frac{k_{\phi}}{k_{\phi}^{np}}} \cdot \ln \frac{1,5191+2/h}{1,5191} \right)$$

окончательно получаем

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 \left(1 + 0,0794 \cdot \sqrt[3]{k_{\phi}} \cdot \ln \frac{1,5191h+2}{1,5191h} \right). \quad (7)$$

Результаты вычислений для рассматриваемых профилей по (4) – (7) представлены в сравнительной форме в табл. 3–5.

Таблица 3

Значения увеличения σ_{gr}/σ_0 для прямоугольного поперечного сечения по (4) – (7)

высота сечения h , м	0,03	0,05	0,06	0,1	0,2	0,3	0,4
функция							
дробно-линейная (4)	1,384	1,333	1,311	1,249	1,166	1,124	1,099
иррациональная (5)	1,373	1,328	1,313	1,275	1,232	1,209	1,195
логарифмическая (6)	1,372	1,329	1,313	1,270	1,214	1,182	1,161
логарифмическая (7)	1,381	1,331	1,313	1,265	1,203	1,169	1,146
максимальная разница, %	0,9	0,4	0	2,04	5,4	7,03	8,03

Таблица 4

Значения увеличения σ_{gr}/σ_0 для двутаврового поперечного сечения по (4) – (7)

высота сечения h , м	0,1	0,2	0,3	0,4
функция				
дробно-линейная (4)	1,15	1,098	1,075	1,062
иррациональная (5)	1,239	1,199	1,182	1,171
логарифмическая (6)	1,235	1,185	1,158	1,141
логарифмическая (7)	1,230	1,175	1,146	1,127
максимальная разница, %	7,2	8,4	9,05	10,9

Таблица 5

Значения увеличения σ_{gr}/σ_0 для трубчатого поперечного сечения с тонкой и толстой стенкой по (4) – (7)

высота сечения h , м	0,03	0,05	0,06	0,1	0,2
функция					
дробно-линейная (4)	$\frac{1,304}{1,319}$	$\frac{1,264}{1,280}$	$\frac{1,246}{1,261}$	$\frac{1,197}{1,208}$	$\frac{1,131}{1,141}$
иррациональная (5)	$\frac{1,347}{1,352}$	$\frac{1,305}{1,311}$	$\frac{1,292}{1,296}$	$\frac{1,256}{1,260}$	$\frac{1,216}{1,221}$
логарифмическая (6)	$\frac{1,317}{1,321}$	$\frac{1,306}{1,311}$	$\frac{1,291}{1,318}$	$\frac{1,252}{1,255}$	$\frac{1,199}{1,204}$
логарифмическая (7)	$\frac{1,346}{1,359}$	$\frac{1,308}{1,314}$	$\frac{1,292}{1,297}$	$\frac{1,247}{1,242}$	$\frac{1,189}{1,193}$
максимальная разница, %	$\frac{3,2}{2,9}$	$\frac{3,36}{2,59}$	$\frac{3,56}{4,32}$	$\frac{4,7}{4,13}$	$\frac{7,0}{6,55}$

Выводы

1. Анализ приведенных результатов вычислений показывает, что учет формы поперечного сечения имеет существенное значение для оценки момента наступления пластических деформаций при учете градиентного эффекта. В наименьшей степени он проявляется в двутавровом сечении из-за минимального поддерживающего эффекта тонкой стенки. Тем не менее, в сечениях изгибаемых элементов, имеющих соизмеримые «разумные» размеры (в таблицах затонированы), эффект увеличения напряжения может составлять от 9 до 27 %. Представляется перспективным использование этого эффекта при оценке предельного состояния элементов и конструкций.

2. Использование различных зависимостей для аппроксимации градиентного эффекта при изгибе бруса показывает, что при малых высотах поперечного сечения конкретный вид асимптотической зависимости дает погрешность не более 5 % и определяется лишь вычислительным удобством. При больших значениях h разница достигает 11 % и существенно зависит от формы поперечного сечения. Целесообразно принимать при оценке меньшее из значений, определяющих повышенную область упругого деформирования.

Список литературы

1. Балдин В.А. Об учете пластических деформаций при неравномерном распределении напряжений по сечению // Строительная механика и расчет сооружений. 1977. № 1. С. 29–31.
2. Балдин В.А., Потапов В.Н., Фадеев А.А. О сопротивлении тали деформированию при неравномерном распределении напряжений // Строительная механика и расчет сооружений. 1977. № 1. С.29–31.
3. Фадеев А.А. о переходе малоуглеродистой стали в упруго–пластическое состояние при неравномерном распределении напряжений (при чистом изгибе) // Исследование прочности элементов строительных металлических конструкций: Труды ин-та/ ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1982. С. 85–91.
4. Campus F. Plastification de l'acier doux en flexion plane simple // Bull. de la classe des Sciences de l'Academie R. de Belgique. 1963. Serie 5, 49, 4. P.303–314.
5. Dehousse N.M. Note relative a un phenomene de superelastisite en flexion constate lors d'essais d'un barreau en acier doux // Bull. de la classe des Sciences de l'Academie R. de Belgique. 1962. Serie 5, 48. P.329–334.
6. Гениев Г.А., Калашников С.Ю. Влияние градиентов напряжений, геометрии и масштабов сечений на переход изгибаемых элементов в пластическое состояние // Исследования по строительной механике: Труды ин-та/ ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1985. С. 5–12.
7. Гениев Г.А., Калашников С.Ю. Об учете влияния неоднородности напряженного состояния на переход материала в пластическое состояние // строительная механика и расчет сооружений. 1988. №6. С.12–15.
8. Гениев Г.А., Калашников С.Ю. О построении инкрементальных условий пластичности / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1984. 14 с. Деп. во ВНИИИС 16.02.84. № 4817.
9. Калашников С.Ю. Критерии пластичности, учитывающие влияние неоднородности напряженного состояния // Труды НГАСУ. Новосибирск, 2003. Т.6. № 6(27). С. 142–148.
10. Калашников С.Ю., Левин А.В. О решении задач плоского поперечного изгиба с использованием инкрементального условия пластичности / Волгоградский инж.-строит. ин-т. Волгоград, 1988. 10 с. Деп. во ВНИИИС 13.06.88. №8382.
11. Калашников С.Ю. О решении некоторых двумерных задач с использованием инкрементального условия пластичности / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1984. 16 с. Деп. во ВНИИИС 10.05.84. №5015.
12. Гениев Г.А., Калашников С.Ю. Инкрементальная теория нелинейного деформирования тел в условиях неоднородного напряженного состояния. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. 172 с.
13. Калашников С.Ю. Экспериментальная проверка модели деформирования материала в условиях неоднородного напряженного состояния. Волгоград, Волгогр. гос. техн. ун-т, 2017. 81 с.
14. Калашников С.Ю., Ватанский В.П. Альтернативные аппроксимирующие функции инкрементальной теории нелинейного деформирования тел: материалы ежегодной науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава и студентов ВолгГАСУ, 2008: в 3 ч. Волгоград: ВолгГАСУ, 2008. С. 270–272.

© С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова, С.А. Калиновский

Ссылка для цитирования:

С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова, С.А. Калиновский. Учет формы поперечного сечения изгибаемого бруса в инкрементальном условии пластичности // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2020. № 4 (34). С. 33–37.

УДК 666.45

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОГ

Н.А. Страхова¹, Б.Б. Утегенов², Б.Н. Тулепбергенов², Н.А. Белова³,

А.М. Кокарев², Л.П. Кортовенко²

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск, Россия

²Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россия

³НОЧУВО МФПУ «Синергия», г. Астрахань, Россия

Рассмотрено создание модифицированных композиционных материалов улучшенного качества для строительства автомобильных дорог. Изучено влияние добавок на структуру, механические свойства и долговечность материалов для строительства автомобильных дорог.

Предложены принципиально новые технологии производства композиционных материалов, в основе которых используется химическое взаимодействие серы с модификатором в аппарате вихревого слоя, что позволяет получать новые, надежные, долговечные материалы, обладающие всеми необходимыми качественными характеристиками в условиях жесткой дорожной конкуренции, также были проведены исследования по изучению влияния химического и фракционного составов сырья на скорость окисления битума, которые проводили с учетом изменения температуры размягчения полученных образцов от продолжительности окисления, которое проводили по 2-х стадийной схеме окисления. Определение качества вяжущих и создания оптимальной структуры серобитумных материалов проводили на установке по определению компонентного состава битумов.

Ключевые слова: нанотехнологии, качественные, модифицированные композиционные материалы, 2-х стадийное окисление, компонентный состав, новые долговечные материалы для строительства автомобильных дорог.