

УДК 630.383.4

*МАТВИЕНКО ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
matvolegv@mail.ru,*

*БАЗУЕВ ВИКТОР ПАВЛОВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доцент,
slab@mail.tomsknet.ru*

*ВЕНИК ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, зав. лабораторией,
slab@mail.tomsknet.ru*

*БАЗАРОВ РУСЛАН БАУРЖАНОВИЧ, магистрант,
slab@mail.tomsknet.ru*

*АРУТЮНЯН ЭДУАРД РУБИКОВИЧ, магистрант,
slab@mail.tomsknet.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГОУСТОЙЧИВОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

В работе рассматриваются результаты математического моделирования сдвигоустойчивости асфальтобетонных материалов с учетом соотношения входящих в них компонентов минеральных заполнителей и их формы зерна, а также вязкости битумных вяжущих от воздействия напряжений, возникающих от транспортных нагрузок в процессе эксплуатации покрытия автомобильных дорог. Математическое моделирование данного процесса позволяет наиболее эффективно провести подборы составов асфальтобетонных смесей с дальнейшим их испытанием в соответствии с нормативными требованиями.

Ключевые слова: математическая модель; сдвигоустойчивость; битум; вязкость; давление; трение; текучесть; устойчивость; прочность; реология.

*OLEG V. MATVIENKO, DSc, Professor,
matvolegv@mail.ru,*

*VICTOR P. BAZUEV, PhD, A/Professor,
slab@mail.tomsknet.ru,*

*VLADIMIR N. VENIK, Head of Laboratory,
slab@mail.tomsknet.ru,*

*RUSLAN B. BAZAROV, Undergraduate Student,
slab@mail.tomsknet.ru,*

*EDUARD R. ARUTYNYAN, Undergraduate Student,
slab@mail.tomsknet.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

MATHEMATICAL MODELLING OF ROAD PAVEMENT SHEAR-RESISTANCE

The paper discusses the results of mathematical modeling of shear resistance of asphalt-concrete materials with regard to the ratio between the mineral aggregate components and their

grain shape, and the dependence between viscosity of asphalt binder and stresses arising from traffic loads during the pavement operation. The mathematical simulation of this process provides the most efficient selection of asphalt-concrete mixes and their further testing in accordance with regulatory requirements.

Keywords: mathematical model; shear resistance; bitumen; viscosity; pressure; friction; yield; stability; strength; rheology.

Введение

Потребительские свойства автомобильных дорог в России напрямую связаны с их долговечностью, надежностью. Важным критерием надежности дороги является условие обеспечения сдвигоустойчивости конструктивных слоев и основания дорожной одежды.

Одной из причин снижения потребительских свойств автомобильных дорог является образование колеи на асфальтобетонных покрытиях в результате воздействия возрастающих транспортных нагрузок и высоких температур в летний период, что снижает их межремонтные сроки службы. Формирование колеи происходит в результате воздействия касательных напряжений, вызывающих сдвиг по основанию или по материалу слоя, вследствие чего на поверхности дорожного покрытия образуются наплывы, волны и складки [1–5]. Для получения данных о параметрах колееобразования требуется большое количество измерений передвижными лабораториями, а также большие трудозатраты.

Остаточные деформации на покрытии и образование колеи обуславливаются реологическими свойствами асфальтобетона, которые в свою очередь зависят от состава асфальтобетона. Поэтому одним из направлений повышения долговечности и надежности асфальтобетонных покрытий является разработка новых вяжущих и создание на их основе асфальтобетонных материалов с повышенной сдвигоустойчивостью [6, 7]. В работах [8–17] приведен цикл теоретических и экспериментальных исследований процессов течения и модифицирования битумов в технологических устройствах. В статье [8] приведены теоретические исследования процессов модифицирования битумов в кавитационно-смесительном диспергаторе. Показано, что способ кавитационно-смесительного диспергирования позволяет получить однородную смесь на выходе из кавитационно-смесительного диспергатора. В работе [9] исследован процесс модификации битумов в инжекторном смесителе. Проведенный анализ показывает, что наилучшего смешения можно добиться в сильно закрученном потоке при расположении инжектора в непосредственной близости от завихрителя. В [10] изучено влияние физических характеристик жидкости и скорости ее движения на динамику пузырька, что позволяет оптимизировать процесс вспенивания битума, улучшая его технологические свойства. В [11] исследовано влияние закрутки на процессы турбулизации и реламинаризации потока битумных вяжущих в технологических устройствах для производства новых материалов для дорожного строительства. В [12] 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 распределение эффективной вязкости потока на термически и гидродинамически нестабилизированном участке

течения определяется не только ростом молекулярной вязкости при охлаждении потока, но и процессами турбулизации (реламинаризации) течения. В [13] рассматриваются результаты исследования структуры течения и смешения двух коаксиальных закрученных потоков вязкой жидкости для приготовления битумных дисперсных систем. Анализ поля течения позволяет сделать вывод, что наибольшего качества смешения можно добиться путем организации в потоке рециркуляционной зоны, в которую будут вовлечены оба потока. В [14] рассматриваются результаты экспериментального исследования возникновения кавитации и структуры ее течения в кавитационно-смесительном диспергаторе лабораторной установки при различных расходах жидкости. В [15] исследован процесс образования кавитационных пузырьков в кавитационно-смесительном диспергаторе. Установлено, что при температуре жидкости, близкой к температуре кипения, кавитационная зона локализуется не только в области пережатия канала, но и распространяется вниз по потоку, занимая достаточно большую часть кавитационно-смесительного диспергатора. В [12] 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. В монографии [17] рассмотрены структуры битумов и битумных дисперсных систем, пути улучшения их свойств для создания более качественных битумных вяжущих для применения их в дорожном строительстве в различных климатических условиях. Разработаны математические модели течения закрученных потоков битумных вяжущих в трубах и каналах, возникновения кавитации, а также математические модели модифицирования битумов и получения битумных эмульсий в кавитационно-смесительном диспергаторе.

Проблема повышения долговечности и надежности асфальтобетонных покрытий, однако, не ограничивается разработкой и выбором вяжущих. Для этого необходимо правильно выбирать соотношение битумного вяжущего с определенными реологическими свойствами, а также входящих компонентов минеральных заполнителей с учетом их формы.

Изучению сдвигоустойчивости дорожных покрытий посвящены работы [18–28]. Для оценки и прогнозирования устойчивости дорожных покрытий против сдвигающих усилий широкое распространение получила теория прочности О. Мора [29]. Развитие этой теории нашло отражение в работах Н.Н. Иванова [21, 22] и Д.И. Ганжула [23], где высказано предположение о возможности применения упрощенной теории предельных напряженных состояний. Экспериментальное подтверждение этого предположения для горячего асфальтобетона позволило заменить предельную огибающую кривую (по О. Мору) прямой, описанной известным уравнением Кулона [30]:

$$\tau_s = \sigma_s \operatorname{tg}(\varphi) + \tau_a, \quad (1)$$

где τ_s , σ_s – соответственно касательное и нормальное напряжения в плоскости скольжения (сдвига); $\operatorname{tg}(\varphi)$ – коэффициент внутреннего трения; τ_a – внутреннее сцепление.

Н.Н. Иванов [21] предложил формулу, которая описывает сопротивление сдвигу материалов на органических вяжущих уравнением, аналогичным уравнению Кулона:

$$\tau_s = p \operatorname{tg}(\varphi) + \tau_1 + \tau_{II}, \quad (2)$$

где τ_s – сдвигающее усилие; p – нормальное давление; τ_1 – зацепление минеральных зерен; τ_{II} – сцепление минеральных зерен битумом.

В работе [31] разработана математическая модель, описывающая напряжения и деформации асфальтобетонного пакета при неравномерном поднятии поверхности покрытия, исследованы деформации, возникающие в дорожном покрытии при неравномерном пучении грунтов земляного полотна. Построена схема деформации участка дорожного покрытия в результате неравномерного пучения грунтов земляного полотна. Разработанная модель позволяет определять допустимые значения поднятия поверхности покрытия с учетом различных факторов, которые необходимы для более качественного проектирования морозоустойчивых нежестких дорожных одежд.

Таким образом, разработка математических моделей, которые позволяют учитывать влияние всех компонентов асфальтобетонного материала на его сдвигоустойчивость, дает возможность предварительно оптимизировать их составы, что ускоряет процессы подбора наиболее приемлемых щебеночных заполнителей и битумных вяжущих.

В настоящей работе предложена математическая модель для оценки асфальтобетонных материалов на сдвигоустойчивость от воздействия транспортных нагрузок.

Математическая модель

Асфальтобетонные материалы являются многокомпонентной системой, в которой присутствуют минеральные заполнители зерен различных фракций, а также связующий компонент в виде битумного вяжущего. Поэтому определение и оптимизация зерновых составов и свойств битумного вяжущего являются одним из направлений создания покрытий с повышенной сдвигоустойчивостью. Кроме этого, необходимо уделять особое внимание применению в крупном минеральном заполнителе щебней кубовидной формы. В связи с тем, что разработка и испытание на устойчивость асфальтобетонных материалов занимают очень большой промежуток времени, к решению этой задачи можно подойти на основе математического моделирования, которое упростит решение.

Для математического моделирования сдвигоустойчивости покрытия существуют два подхода:

- модели, основанные на использовании гипотезы взаимопроникающих сред (в таких моделях предполагается, что в каждой точке пространства одновременно находятся несколько различных компонентов);

- осредненные модели, в которых учитываются лишь средние характеристики среды.

В настоящей работе для определения эффективных свойств покрытия используем метод осреднения Т.Г. Войнич-Сяноженцкого [32]. Плотность и напряжение покрытия потока определяем по формулам:

$$\rho = C_1 \rho_1 + C_2 \rho_2 + C_3 \rho_3 + C_4 \rho_{41}; \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = C_1 \sigma_{ij}^{(1)} + C_2 \sigma_{ij}^{(2)} + C_3 \sigma_{ij}^{(3)} + C_4 \sigma_{ij}^{(4)}, \quad (4)$$

где ρ – плотность; σ_{ij} – компоненты соответствующих тензоров напряжений.

Индексы в уравнениях соответствуют следующим компонентам: 1 – кубовидным частицам, 2 – крупным некубовидным частицам, 3 – мелким частицам, 4 – битуму.

Уравнения равновесия материала в форме Коши имеют вид [29, 33]

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} = -f_i, \quad (5)$$

где f_i – компоненты вектора внешних массовых сил.

Для замыкания системы уравнений (5) необходимо определить реологические соотношения, определяющие свойства компонентов, входящих в состав покрытия.

Для построения моделей текучих сред нужно установить связь между девиаторами скорости деформации и напряжений [30]. Для изотропных сред это соотношение не должно зависеть от выбора направления осей декартовой системы координат. В тензорно линейных моделях такая связь задаётся соотношениями:

$$\tau_{ij} = 2K \dot{\epsilon}_{ij}; \quad \sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \tau_{ij}, \quad (6)$$

в котором K может зависеть от второго и третьего инвариантов тензора скоростей деформаций $\dot{\epsilon}$ (первый инвариант в несжимаемой среде равен нулю).

Тензор скоростей деформаций определяется соотношениями Коши:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (7)$$

В классических моделях предполагается зависимость K только от второго инварианта. В качестве вторых инвариантов тензоров $\dot{\epsilon}$ и σ удобно ввести $U = \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} / 2$ и $T = \sigma_{ij} \sigma_{ij} / 2$. Тогда из (6) вытекают следующие соотношения между инвариантами:

$$T = UK; \quad T = \sqrt{\tau_{ij} \tau_{ij} / 2}; \quad U = \sqrt{2 \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}. \quad (8)$$

Если связь (8) 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.

Несмотря на кажущуюся простоту, соотношения (8) описывают сложные нелинейные зависимости напряжённого состояния среды от скорости деформации.

Идеально-пластическая среда. Для коэффициента K предполагается следующая зависимость от инварианта U [29]: $K = \tau_s / U$. Отсюда получим соотношение

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\tau_s \dot{\epsilon}_{ij} / U; \quad T = \tau_s. \quad (9)$$

При течении в идеально пластической среде второй вариант тензора напряжений постоянен. Максимальные напряжения на площадках близки к постоянному значению τ_s .

Вязкопластическая среда. Кривая течения этих жидкостей отсекает на оси напряжений (при $\dot{\epsilon}_{ij} = 0$) отрезок конечной длины, равный пределу текучести τ_s . Следовательно, вязкое течение таких сред начинается после превышения предела текучести τ_s . Ниже этого предела вязкопластичная среда ведет себя как твердое тело. Величина τ_s характеризует пластические свойства среды, а наклон кривой течения к оси $\dot{\epsilon}_{ij}$ – ее подвижность. Вязкопластичные среды с линейной кривой течения называют *линейно-вязкопластичными* (жидкостями Шведова – Бингама). В случае нелинейной кривой течения говорят о нелинейно-вязкопластичных (так называемых небингамовских) средах. Зависимость коэффициента K от инварианта U имеет вид [30] $K = \mu + \tau_s / U$, а реологические соотношения могут быть записаны как

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2(\mu + \tau_s / U) \dot{\epsilon}_{ij}; \quad T = \mu U + \tau_s. \quad (10)$$

В движущейся вязкопластической среде может быть жёсткая зона, в которой скорость деформации равна нулю $U = 0$. В этой области второй инвариант T не определён и подчиняется равенству $T \leq \tau_s$. Окончательная формулировка реологического соотношения, учитывающая наличие жёстких зон, будет такой:

$$\left. \begin{aligned} s_{ij} &= 2(\mu + \tau_s / U) \dot{\epsilon}_{ij} \\ T &= \tau_s + \mu U \end{aligned} \right\}, \text{ если } U > 0. \quad \text{Если } U = 0, T \leq \tau_s. \quad (11)$$

Это соотношение можно разрешить относительно компонент тензора деформаций и выразить их через компоненты тензора напряжений. Полученное соотношение будем называть обратным соотношением девиаторов напряжений и деформаций

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} &= \frac{T - \tau_s}{2\mu} s_{ij} \\ U &= (T - \tau_s) / \mu \end{aligned} \right\}, \text{ если } T > \tau_s. \quad \text{Если } T \leq \tau_s, U = 0. \quad (12)$$

Гранулированная среда. Для описания свойств сыпучих сред в настоящей работе используются реологические соотношения, основанные на экспериментах [34]:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \frac{\tau_0 + p \operatorname{tg} \varphi}{U} \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (13)$$

где τ_0 – пороговое напряжение сдвига, характеризующее сцепление; φ – угол внутреннего трения.

Условие подвижности такого материала может быть записано в виде $T \leq \tau_0 + p \operatorname{tg} \varphi$.

Физико-механические свойства компонентов покрытия

По своему гранулометрическому составу частицы мелких фракций содержатся в количестве от 30 до 40 %. Угол внутреннего трения равен $26^{\circ}36'$ и сцепление $\tau_0 = 0,03$.

По своему гранулометрическому составу некубовидные частицы крупных фракций содержатся в количестве от 30 до 40 %. Угол внутреннего трения равен 31° и сцепление – 0,075 МПа.

По своему гранулометрическому составу кубовидные частицы крупных фракций содержатся в количестве от 30 до 40 %. Угол внутреннего трения равен 55° и сцепление – 0,475 МПа.

Содержание битума в покрытии составляет около 5–6 %. Битум является вязкопластической средой, характеризуемой следующими параметрами: предельное напряжение сдвига $\tau_s = 9,8$ Па, коэффициент динамической вязкости при температуре 45°C равен $\mu = 8,5$ Па·с.

Определение предела прочности покрытия

В соответствии с подходом, описанным выше, материал будет вести себя как твердое тело, если действующие на него нагрузки не превзойдут предел текучести. Эффективный предел текучести может быть найден как

$$\tau_y = C_1(\tau_{01} + p \operatorname{tg} \varphi_1) + C_2(\tau_{02} + p \operatorname{tg} \varphi_2) + C_3(\tau_{03} + p \operatorname{tg} \varphi_3) + C_4 \tau_s. \quad (14)$$

Определим теперь нагрузку, оказываемую на дорожное покрытие. Эта нагрузка содержит нормальную и касательную составляющие. Нормальная составляющая связана с давлением p автомобиля на поверхность покрытия. Касательная составляющая связана с контактным трением и может быть определена из закона Кулона – Амонтона: $\tau_{fr} = fp$, где f – коэффициент контактного трения. Результирующая величина нагрузки определится как величина равнодействующей нормального и касательного напряжений [35]:

$$T = p\sqrt{1 + f^2}. \quad (15)$$

Таким образом, условие устойчивости дорожного покрытия к внешним нагрузкам может быть окончательно записано в виде

$$p\sqrt{1 + f^2} < c_1(\tau_{01} + p \operatorname{tg} \varphi_1) + c_2(\tau_{02} + p \operatorname{tg} \varphi_1) + c_3(\tau_{03} + p \operatorname{tg} \varphi_3) + c_4 \tau_s. \quad (16)$$

Результаты расчетов

На основе построенной математической модели можно определить долю кубовидного зерна, обеспечивающую сдвигоустойчивость покрытия для различных содержаний мелких и крупных некубовидных зерен. При проведении анализа значения основных параметров принимались равными следующим величинам: $\tau_{01} = 0,300$ МПа, $\tau_{02} = 0,275$ МПа, $\tau_{03} = 0,075$ МПа, $\tau_s = 0,0098$ МПа, $\varphi_1 = 55^{\circ}$, $\varphi_2 = 31^{\circ}$, $\varphi_3 = 26^{\circ}36'$, $f = 0,1$, $p = 0,4$ МПа, $c_4 = 0,05$.

В качестве характерной величины используется безразмерный комплекс

$$z = \frac{c_1(\tau_{01} + p \operatorname{tg} \varphi_1) + c_2(\tau_{02} + p \operatorname{tg} \varphi_1) + c_3(\tau_{03} + p \operatorname{tg} \varphi_3) + c_4 \tau_s}{p \sqrt{1 + f^2}}. \quad (17)$$

Как следует из определения, устойчивость покрытия достигается при $z > 1$.

На рис. 1–3 представлены результаты расчетов по определению сдвигоустойчивости покрытия.

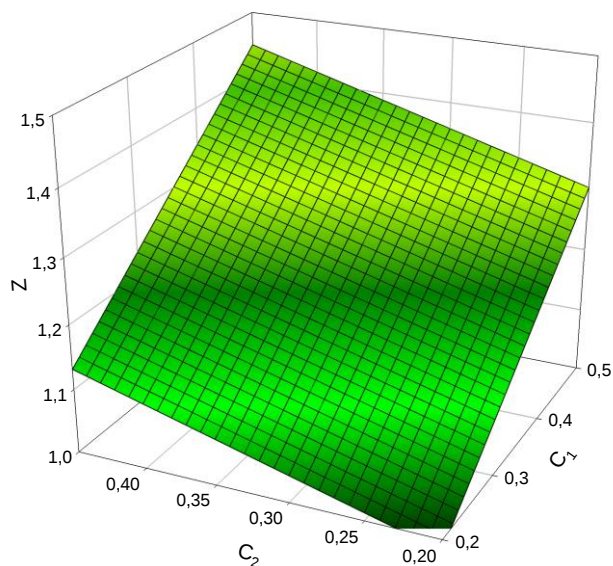


Рис. 1. Влияние содержания кубовидных и крупных некубовидных частиц на устойчивость дорожного покрытия

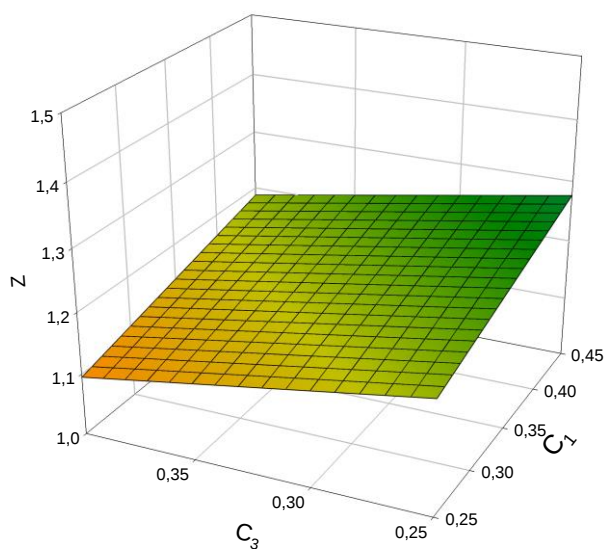


Рис. 2. Влияние содержания кубовидных частиц и частиц мелких фракций на устойчивость дорожного покрытия

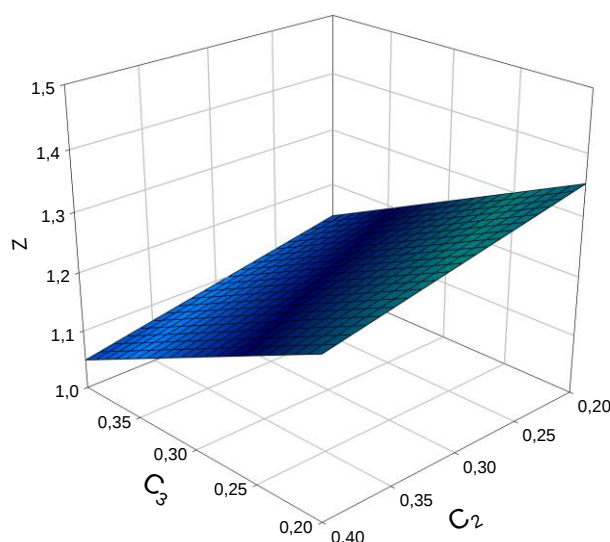


Рис. 3. Влияние содержания крупных некубовидных частиц и частиц мелких фракций на устойчивость дорожного покрытия

На рис. 1 показано влияние содержания кубовидных и крупных некубовидных частиц на устойчивость дорожного покрытия. Из рисунка видно, что при малом содержании частиц этих фракций $C_1 < 0,22$, $C_2 < 0,22$ и большой доле частиц мелких фракций $C_3 < 0,50$ критерий сдвигустойчивости дорожного покрытия $z < 1$. Это означает, что при выбранных значениях дорожное покрытие не является устойчивым к сдвигу. С ростом содержания кубовидных и крупных некубовидных частиц устойчивость дорожного покрытия возрастает. Отметим, что при увеличении доли кубовидных частиц до $C_1 = 0,5$ при том же содержании крупных некубовидных частиц и битумного вяжущего повышается коэффициент устойчивости до $z = 1,5$. Однако увеличение доли крупных некубовидных частиц до $C_2 = 0,5$ при том же содержании кубовидных частиц приводит к увеличению параметра устойчивости всего лишь до значений $z = 1,13$. Таким образом, наибольший вклад в устойчивость покрытия вносят частицы кубовидной формы.

На рис. 2 представлено влияние содержания кубовидных частиц, а также частиц мелких фракций на устойчивость дорожного покрытия. Как видно из рисунка, с увеличением содержания частиц мелких фракций устойчивость дорожного покрытия уменьшается. Так, при содержании кубовидных частиц $C_1 = 0,25$ увеличение доли мелких частиц с $C_2 = 0,25$ до $C_2 = 0,4$ (за счет уменьшения доли крупных некубовидных частиц) приводит к уменьшению параметра устойчивости с $z = 1,2$ до $z = 1,1$. При этом увеличение доли кубовидных частиц с $C_1 = 0,25$ до $C_1 = 0,45$ за счет уменьшения доли крупных некубовидных частиц при $C_3 = 0,25$ приводит к росту параметра устойчивости с $z = 1,2$ до $z = 1,37$.

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что увеличение доли частиц мелких фракций за счет уменьшения кубовидных частиц при

$C_2 = 0,4$ приводит к уменьшению параметра устойчивости $z = 1,05$. Отметим, что увеличение доли крупных некубовидных частиц за счет кубовидных частиц при том же содержании частиц мелких фракций также уменьшает значения параметра устойчивости. Так, при $C_3 = 0,2$ увеличение доли крупных некубовидных частиц с $C_2 = 0,2$ до $C_2 = 0,4$ приводит к уменьшению параметра устойчивости с $z = 1,35$ до $z = 1,2$.

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлено, что основной вклад в сдвигоустойчивость дорожного покрытия вносят кубовидные частицы, содержание которых должно быть не менее 25 %. Второй по значимости фракцией являются крупные некубовидные частицы, содержание которых также должно быть не менее 25 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бонченко, Г.А. Асфальтобетон. Сдвигоустойчивость и технология модифицирования полимером / Г.А. Бонченко. – М. : Машиностроение, 1994. – 176 с.
2. Wang, H. Near-Surface Pavement Failure Under Multiaxial Stress State in Thick Asphalt Pavement / H. Wang, I.L. Al-Qadi // Journal of the Transportation Research Board. – 2010. – № 2514. – P. 91–99.
3. Measurement of Contact Stresses for Different Truck Tires Types to Evaluate Their Influence on Near-Surface / L.A. Myers, R.C.A. Roque, B.E. Ruth, C. Drakos // Journal of the Transportation Research Board. – 1999. – № 1655. – P. 175–184.
4. Drakos, C.A. Effects of Measured Tire Contact Stresses in Near-Surface Rutting / C.A. Drakos, R. Roque, B. Birgisson // Journal of the Transportation Research Board. – 2001. – № 1764. – P. 59–69.
5. Analysis of Shear Stress in Asphalt Pavements Under Actual Measured Tire-Pavement Contact Pressure / K. Su, L. Sun, Y. Hachiya, R. Maekawa // Proceedings of the 6th ICPT, Japan. – 2008. – P. 11–18.
6. Руденский, А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия / А.В. Руденский. – М. : Транспорт, 1992.
7. Руденский, А.В. Применение резиновой крошки для повышения качества дорожных битумов и асфальтобетонов / А.В. Руденский, А.С. Хромов, В.А. Марьев // Дороги России XXI века. – 2004. – № 5. – С. 62–67.
8. Базуев, В.П. Моделирование процесса модифицирования битума в кавитационно-смесительном диспергаторе / В.П. Базуев, О.В. Матвиенко, В.Л. Вороненко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 4. – С. 121–128.
9. Исследование процесса модификации битума в инжекторном смесителе / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.Г. Туркасова, А.И. Байгулова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 3. – С. 202–213.
10. Матвиенко, О.В. Исследование динамики пузырька в закрученном потоке нелинейно-вязкой жидкости / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, М.В. Агафонцева // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4 (37). – С. 144–156.
11. Матвиенко, О.В. Численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вязущих / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.К. Южанова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 2 (39). – С. 132–143.
12. Численное исследование структуры течения и теплообмена при закрученном течении битумно-дисперсных систем в цилиндрических каналах / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.К. Дульзон, Н.Г. Смирнова, М.В. Агафонова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 2 (43). – С. 80–93.
13. Исследование смешения коаксиальных закрученных потоков для приготовления битумных дисперсных систем / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.Г. Смирнова, Г.В. Пушкарева,

- Н.К. Дульзон // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 3 (44). – С. 123–134.
14. Экспериментальное исследование процесса кавитации в технологических устройствах / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, В.Н. Веник, Н.Г. Смирнова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 6 (53). – С. 165–176.
 15. Численное исследование процесса образования кавитационных пузырьков в смесительном устройстве / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, В.Н. Веник, Н.Г. Смирнова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 4. – С. 231–245.
 16. Численное моделирование распада турбулентной струи в спутном закрученном потоке / О.В. Матвиенко, А.К. Эфа, В.П. Базуев, Е.В. Евтюшкин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. – Т. 49. – № 6. – С. 96–107.
 17. Матвиенко, О.В. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем / О.В. Матвиенко, Ф.Г. Унгер, В.П. Базуев. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 336 с.
 18. Takemi Inoue. Rational design method of hot mix asphalt based on calculated VMA / Takemi Inoue, Yasuo Gunji, Hirokazu Akagi // Eurasphalt & Eurobitume Congress. – Vienna, 2004.
 19. Кирюхин, Г.Н. Остаточные деформации в асфальтобетонных покрытиях / Г.Н. Кирюхин // Наука и техника в дор. отрасли. – 1998. – № 3. – С. 14–16.
 20. Казарновский, В.Д. Оценка сдвигоустойчивости связных грунтов в дорожном строительстве / В.Д. Казарновский. – М. : Транспорт, 1985. – 168 с.
 21. Иванов, Н.Н. Выбор типа и способа подбора асфальтобетона / Н.Н. Иванов // Доклады по вопросам строительства черных дорог. – М.; Л. : ОГИЗ Гострансиздат, 1932. – С. 175–190.
 22. Иванов, Н.Н. Черные дороги / Н.Н. Иванов. – М. : ОГИЗ Гострансиздат, 1931. – 173 с.
 23. Ганжула, Д.И. Требования к асфальтобетонным покрытиям, работающим при высоких температурах : дис. ... канд. техн. наук. – М., 1955. – 137 с.
 24. Шахназарова, М.А. Повышение устойчивости однослойных асфальтобетонных покрытий : дис. ... канд. техн. наук. – М., 1959. – 145 с.
 25. Толстиков, Н.П. Исследование сдвигоустойчивости дорожных одежд по контакту асфальтобетонное покрытие – цементогрунтовое основание : дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 1965. – 140 с.
 26. Страгис, В.И. Обоснование требований к сдвигоустойчивости асфальтобетона применительно к местным условиям Литовской ССР : дис. ... канд. техн. наук. – Вильнюс, 1974. – 151 с.
 27. Агалаков, Ю.А. Исследование работоспособности тонких асфальтобетонных покрытий с повышенным содержанием щебня на цементобетонных основаниях : дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 1999. – 216 с.
 28. Корочкин, А.В. Сдвигоустойчивость асфальтобетонных слоев жесткой дорожной одежды / А.В. Корочкин // Строительные материалы. – 2014. – Январь/февраль. – С. 65–67.
 29. Горшков, А.Г. Теория упругости и пластичности / А.Г. Горшков, Э.И. Старовойтов, Д.В. Тарлаковский. – М. : Физматлит, 2002. – 416 с.
 30. Климов, Д.М. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость и перемешивание / Д.М. Климов, А.Г. Петров, Д.В. Георгиевский. – М. : Наука, 2005. – 394 с.
 31. Матвиенко, О.В. Моделирование напряжений и деформаций дорожных покрытий / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, В.С. Чурилин // Дороги и мосты. – 2016. – С. 139–153.
 32. Войнич-Сяноженцкий, Т.Г. Гидродинамическая теория лавинообразных потоков и определение их характеристик / Т.Г. Войнич-Сяноженцкий, Т.А. Обгадзе // Тр. Тбилисского гос. ун-та. – 1984. – № 36. – Т. 252. – С. 228–261.
 33. Матвиенко, О.В. Исследование пластической деформации толстостенной трубы из сплава, упрочненного некогерентными наночастицами / О.В. Матвиенко, О.И. Данейко, Т.А. Ковалевская // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 2. – С. 35–45.
 34. Savage, S.B. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline / S.B. Savage, K. Hutter // Journal of Fluid Mechanics. – 1989. – V. 199. – P. 177–215.
 35. Островский, Г.М. Прикладная механика неоднородных сред / Г.М. Островский. – СПб. : Наука, 2000. – 359 с.

REFERENCES

1. Bonchenko G.A. Asphaltobeton. Sdvigoustoichivost' i tekhnologiya modifitsirovaniya polimerom [Shear resistance and polymer modification technology]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1994. 176 p. (rus)
2. Wang H., Al-Qadi I.L. Near-Surface pavement failure under multiaxial stress state in thick asphalt pavement. *Journal of the Transportation Research Board*. 2010. No. 2514. Pp. 91–99.
3. Myers L.A., Roque R.C.A., Ruth B.E., Drakos C. Measurement of contact stresses for different truck tires types to evaluate their influence on near-surface. *Journal of the Transportation Research Board*. 1999. No. 1655. Pp. 175–184.
4. Drakos C.A., Roque R., Birgisson B. Effects of measured tire contact stresses in near-surface rutting. *Journal of the Transportation Research Board*. 2001. No. 1764. Pp. 59–69.
5. Su K., Sun L., Hachiya Y., Maekawa R. Analysis of shear stress in asphalt pavements under actual measured tire-pavement contact pressure. *Proc. 6th ICPT, Japan*. 2008. Pp. 11–18.
6. Rudenskiy A.V. Dorozhnye asphaltobetonnye pokrytiya [Road asphalt-concrete pavements]. Moscow: Transport Publ., 1992. 254 p. (rus)
7. Rudenskiy A.V., Khromov A.S., Mar'ev V.A. Primenenie rezinovoi kroshki dlya povysheniya kachestva dorozhnykh bitumov i asphaltobetonov [Rubber granulate for quality improvement of bitumen and asphalt-concrete]. *Dorogi Rossii XXI veka*. 2004. No. 5. Pp. 62–67. (rus)
8. Bazuev V.P., Matvienko O.V., Voronenko V.L. Modelirovaniye protsessa modifitsirovaniya bituma v kavitatsionno-smesitel'nom dispergatore [Modeling of bitumen modification in cavitation mixing dispersing agent]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010. No. 4. Pp. 121–128. (rus)
9. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Turkasova N.G., Baigulova A.I. Issledovanie protsessa modifikatsii bituma v inzhektor'nom smesitele [Investigation of bitumen modification in injector mixer]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 3. Pp. 202–213. (rus)
10. Matvienko O.V., Agafontseva M.V., Bazuev V.P. Issledovaniye dinamiki puzyrka v zakruchennom potoke nelineynno-vyazkoy zhidkosti [Bubble dynamics in a swirl 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., Yuzhanova N.K. Chislennoe issledovanie perekhoda k turbulentnomu rezhimu techeniya vnutrennikh zakruchennykh potokov bitumnykh vyazhushchikh [Computational investigation of internal swirl flows of asphalt binders transitioned to a turbulent flow]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 132–143. (rus)
12. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dul'zon N.K., Smirnova N.G., Agafonova M.V. Chislennoe issledovanie struktury techeniya i teploobmena pri techenii bitumno-dispersnykh sistem v tsilindricheskikh kanalakh [Numerical investigation of flow structure and heat exchange of swirl flows of disperse bitumen system in cylindrical channels]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2. Pp. 80–93. (rus)
13. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Smirnova N.G., Pushkareva G.V., Dul'zon N.K. Issledovanie smesheniya koaksial'nykh zakruchennykh potokov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [A study of mixing coaxial swirl flows for preparation of asphalt dispersion systems]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 3. Pp. 123–134. (rus)
14. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Eksperimentalnoe issledovanie protsessa kavitatsii v tekhnologicheskikh ustroystvakh [Experimental study of cavitation in different apparatuses]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. Pp. 165–176. (rus)
15. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Chislennoe issledovanie protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyr'kov v smesitel'nom ustroystve [Numerical calculation of cavitation bubbles in mixing disperser]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 4. Pp. 231–245. (rus)
16. Matvienko O.V., Efa A.K., Bazuev V.P., Evtyushkin E.V. Chislennoe modelirovaniye raspada turbulentnoi strui v sputnom zakruchennom potoke [Numerical modeling of turbulent jet disintegration in concurrent swirl flow]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fizika*. 2006. 49. No. 6. Pp. 96–107. (rus)
17. Matvienko O.V., Unger F.G., Bazuev V.P. Matematicheskie modeli proizvodstvennykh protsessov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [Mathematical models of manu-

- facturing processes for preparation of bitumen dispersed systems]. Tomsk: TSUAB Publ., 2015. 336 p. (rus)
18. *Takemi Inoue, Yasuo Gunji, Hirokazu Akagi*. Rational design method of hot mix asphalt based on calculated VMA. Eurasphalt & Eurobitume Congress. Vienna, 2004.
 19. *Kiryuhin G.N.* Ostatochnye deformatsii v asfal'tobetonnykh pokrytiyakh [Ostatochnye deformatsii v asfal'tobetonnykh pokrytiyakh]. *Nauka i tekhnika v dor. otrasli*. 1998. No. 3. (rus)
 20. *Kazarnovskiy V.D.* Otsenka sdvigoustoichivosti svyaznykh gruntov v dorozhnom stroitel'stve [Shear resistance of binder soils in road construction]. Moscow: Transport Publ., 1985. (rus)
 21. *Ivanov N.N.* Vybor tipa i sposoba podbora asfal'tobetona [Selection of asphalt concrete]. Doklady po voprosam stroitel'stva chernykh dorog. Moscow; Leningrad: Gostransizdat Publ., 1932. (rus)
 22. *Ivanov N.N.* Chernye dorogi [Black roads]. Moscow: Gostransizdat Publ., 1931. (rus)
 23. *Ganzhula D.I.* Trebovaniya k asfal'to-betonnykh pokrytiyam rabotayushchim pri vysokikh temperaturah: dis. ... kand. tehn. nauk: utv. [Requirements for asphalt-concrete pavements at high-temperature conditions. PhD Thesis]. Moscow, 1955. 137 p. (rus)
 24. *Shahnazarova M.A.* Povyshenie ustoychivosti odnosloynnykh asfal'tobetonnykh pokrytiy: dis. ... kand. tehn. nauk [Stability enhancement of one-layer road pavements]. Moscow, 1959. 145 p. (rus)
 25. *Tolstikov N.P.* Issledovanie sdvigoustoychivosti dorozhnykh odezhd po kontaktu asfal'tobetonnoe pokrytie – tsementogruntovoe osnovanie: dis. ... kand. tehn. nauk [Shear resistance of road pavements at the interface of road pavement-subgrade. PhD Thesis]. Volgograd, 1965. 140 p. (rus)
 26. *Stragis V.-V.I.* Obosnovanie trebovaniy k sdvigoustoychivosti asfal'tobetona primenitelno k mestnym usloviyam Litovskoy SSR dis. ... kand. tehn. nauk [Rationale for shear resistance of asphalt concrete to conditions of Lithuanian Republic. PhD Thesis]. Vilnius, 1974. 151. p. (rus)
 27. *Agalakov Yu.A.* Issledovanie rabotosposobnosti tonkiy asfal'tobetonnykh pokrytiy s povyshennym soderzhaniey schebnya na tsementobetonnykh osnovaniyakh: dis. ... kand. tehn. nauk [Workability of road pavements with higher content of crushed stone. PhD Thesis]. Omsk, 1999. 216 p. (rus)
 28. *Korochkin A.V.* Sdvigoustoychivost asfal'tobetonnykh sloev zhestkoy dorozhnoy odezhd [Shear resistance of asphalt concrete layers of road pavement]. *Stroitelnye materialy*. 2014. Pp. 65–67. (rus)
 29. *Gorshkov A.G., Starovoytov E.I., Tarlakovskiy D.V.* Teoriya uprugosti i plastichnosti [Elasticity and plasticity theory]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2002 p. (rus)
 30. *Klimov D.M., Petrov A.G., Georgievskiy D.V.* Vyazkoplasticheskie techeniya: dinamicheskyy haos, ustoychivost i peremeshivanie [Elasoplastic flows: dynamic chaos, stability and displacement]. Moscow: Nauka Publ., 2005. p. (rus)
 31. *Matvienko O.V., Bazuev V.P., Churilin V.S.* Modelirovaniye napryazheniy i deformatsiy dorozhnykh pokrytiy [Modeling of stresses and deformation of road pavements]. *Dorogi i mosty*. 2016. Pp. 139–153. (rus)
 32. *Voynich-Syanozhentskiy T.G., Obgadze T.A.* Gidrodinamicheskaya teoriya lavinoobraznykh potokov i opredeleniye ikh harakteristik [Hydrodynamic theory of avalanche-type flows and their parameters]. *Proc. Tbilisi State University*. 1984. V. 252. (rus)
 33. *Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A.* Issledovanie plasticheskoy deformatsii tolstostennoy trubyy iz splava, uprochnennogo nekogerentnyimi nanochastitsami [Plastic deformation of copper-based alloy reinforced with incoherent nanoparticles]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fizika*. 2017. V. 60. No. 2. Pp. 35–45. (rus)
 34. *Savage S.B., Hutter K.* The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of Fluid Mechanics*. 1989. V. 199. Pp. 177–215.
 35. *Ostrovskiy G.M.* Prikladnaya mehanika neodnorodnykh sred [Applied mechanics of heterogeneous media]. St-Petersburg: Nauka Publ., 2000. 359 p. (rus)