



ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВИБРОПОЛЗУЧЕСТИ

З. Г. Тер-Мартirosян, А. Н. Шебуняев, И. Е. Демин

Тер-Мартirosян Завен Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7 (495) 287-49-14, доб. 1425; e-mail: Ter-MartyrosyanZG@mgsu.ru;

Шебуняев Александр Николаевич, аспирант, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация тел.: +7 (977) 946-11-93; e-mail: shebunyaev95@mail.ru;

Демин Иван Евгеньевич, инженер, ООО «ПГС», г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7 (929) 607-12-70; e-mail: Tihan11@inbox.ru

В статье приведены результаты испытаний песчаного грунта при действии вибраций на экспериментальной конструкции грунтового динамического шарикового вискозиметра при различных значениях нагрузки на шарик и величине обжимающего давления с обработкой полученных результатов и выявлением зависимостей. На основе полученных данных была подтверждена выдвинутая гипотеза о влиянии напряженного состояния грунта на интенсивность виброползучести: снижение интенсивности касательных напряжений и увеличение среднего напряжения приводят к увеличению коэффициента вязкости песчаного грунта при действии вибрации. Выявленная закономерность нашла теоретическое объяснение при рассмотрении несвязного грунта на уровне равновесия и перемещения его отдельных гранул. Выявленные зависимости в отдельности носят нелинейный экспоненциальный характер и в совокупности могут быть объединены в виде дробно-линейной функции Тимошенко.

Ключевые слова: динамический грунтовый вискозиметр, песчаный грунт, виброползучесть, динамическая нагрузка, обжимающее давление, интенсивность касательных напряжений.

INFLUENCE OF THE STRESSED STATE OF SANDY SOIL ON THE INTENSITY OF VIBROCREEP

Z. G. Ter-Martirosyan, A. N. Shebunyaev, I. Ye. Demin

Ter-Martirosyan Zaven Grigoryevich, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: +7 (495) 287-49-14, ext. 1425; e-mail: Ter-MartyrosyanZG@mgsu.ru;

Shebunyaev Aleksandr Nikolayevich, post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: +7 (977) 946-11-93; e-mail: shebunyaev95@mail.ru;

Demin Ivan Yevgenyevich, engineer, LLC «PGS», Moscow, Russian Federation, phone: +7(929)607-12-70; e-mail: Tihan11@inbox.ru

The article presents the result of a series of tests of sandy soil under the action of vibrations on an experimental design of a ground dynamic ball viscometer at different values of the load on the ball and the amount of compressive pressure with the processing of the results obtained and the identification of mathematical dependencies. The results fully satisfied the hypothesis put forward about the influence of the stressed state of the soil on the intensity of vibration creep: a decrease in the intensity of tangential stresses and an increase in the average stress led to an increase in the viscosity coefficient of sandy soil under the action of vibration. The results of the experiment found a theoretical explanation when considering the disconnected soil at the equilibrium level and the movement of its individual granules. The revealed dependencies are individually nonlinear exponential in nature and together can be combined in the form of a fractional-linear Timoshenko function.

Keywords: dynamic soil viscometer, sandy soil, vibrocreep, dynamic load, compressive pressure, intensity of tangential stresses.

Из обзора публикаций установлено [20], что в области изучения виброползучести проведен достаточный объем исследований в части влияния влажности грунта, частоты вибраций [18], виброускорений [1, 21], динамического давления [10, 15], и в обозримом поле научных публикаций отсутствуют результаты исследований влияния средних напряжений и касательных напряжений на величину вязкости песчаного грунта при действии вибрации, что требует проведения научных изысканий для обеспечения инженерно-строительной отрасли более полным знанием о работе оснований в различных условиях нагружения [6].

Для попытки восполнения данного пробела в рамках исследования проведена серия испытаний

на предложенной авторами конструкции грунтового динамического шарикового вискозиметра (рис. 1) [7]. В основу проведения эксперимента положена гипотеза о том, что коэффициент вязкости дисперсной среды при действии вибрации должен увеличиваться с ростом средних напряжений, формируемых обжимающим давлением, как это отметил О. А. Савинов [11, с. 65], потому что вязкие сдвиговые деформации происходят за счет взаимного перемещения зерен относительно друг друга, их перекатывания и проскальзывания, которым препятствуют силы трения, возрастающие с ростом нормального усилия [17]. Также сформулирована гипотеза о том, что интенсивность касательных напряжений и коэффициент вязкости связаны между собой определенным

отношением, а не являются обособленными друг от друга, как, например, в реологической модели Ньютона. Скорость виброползучести должна увеличиваться с ростом касательных напряжений, поскольку в большем количестве гранул нарушается условие равновесия, и сдвигающие усилия превышают удерживающие.

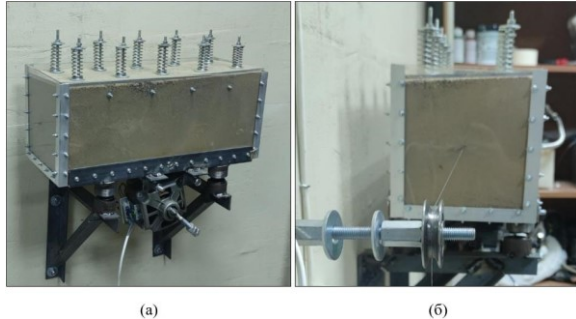


Рис. 1. Фотографии грунтового динамического шарикового вискозиметра:
(а) – общий вид прибора, (б) – вид прибора сбоку

Для проверки вышеуказанной гипотезы проведена серия экспериментов с использованием различной нагрузки F (1,0–5,0 кг с шагом 0,5 кг), обеспечивающей перемещение шарика через песчаный образец, подверженный действию вибрации, а также с различным уровнем статического обжимающего давления σ – без обжимающего давления, 1,5 кПа, 3,0 кПа и 4,5 кПа, что с учетом собственного веса грунта на уровне перемещения шарика соответствует значениям 1,9 кПа, 3,4 кПа, 4,8 кПа и 6,3 кПа. Отметим, что обжимающее давление σ формирует в условиях компрессии среднее напряжение грунта σ_m и

они прямо пропорциональны $\sigma \sim \sigma_m$ [17], а протаскивающее усилие F и интенсивность касательных напряжений τ_i , исходя из постановки задачи Стокса, также прямо пропорциональны $F \sim \tau_i$ [10, с. 31, 249], поэтому установленные формы зависимости для протаскивающего усилия F и обжимающего давления σ также концептуально справедливы для интенсивности касательных напряжений τ_i и средних напряжений σ_m . Для обеспечения чистоты эксперимента в целях исключения влияния иных условий измерения проводились с использованием одного образца грунта и с одним уровнем вибраций.

Результаты измерений скорости перемещения и вязкости при различных значениях нагрузки и обжимающего давления приведены ниже в таблице 1. Для получения каждого значения скорости перемещения при определенной нагрузке и обжимающем давлении проведено 15 измерений с последующей статистической обработкой (в т. ч. с отбраковкой значений, выбивающихся из общего ряда). Вычисление коэффициента вязкости η проведено по формуле (1) [7].

$$\eta = \frac{F}{6\pi \cdot r \cdot \frac{s}{t} \cdot \left(1 + 2,1 \cdot \frac{r}{R_0}\right) \cdot \left(1 + 1,33 \cdot \frac{r}{h}\right)}, \quad (1)$$

где F – сила, под действием которой шарик приводится в движение; r – радиус шарика, м; R_0 – гидравлический радиус сечения рабочей камеры, м; h – длина рабочей камеры, м; s – расстояние, м, на которое перемещен шарик за время t ; t – время, с, за которое шарик перемещен на расстояние s .

Таблица 1

Результаты измерений скорости перемещения и коэффициента вязкости при различных значениях нагрузки и обжимающего давления

Нагрузка F , кг	Скорость перемещения ϑ , мм/с (слева), и коэффициент вязкости η , Па·с (справа), при обжимающем давлении σ , кПа							
	1,9 кПа		3,4 кПа		4,8 кПа		6,3 кПа	
1,0	2,17	16 485	0,96	37 056	0,05	731 556	0,004	9 696 345
1,5	5,78	9 273	3,81	14 062	0,35	154 851	0,010	5 263 396
2,0	7,52	9 496	5,50	12 987	0,59	120 201	0,017	4 284 099
2,5	26,37	3 385	7,48	11 939	2,22	40 154	0,026	3 497 960
3,0	39,74	2 695	12,36	8 665	5,03	21 313	0,034	3 116 682
3,5	181,51	688	20,77	6 015	8,33	14 994	0,044	2 810 782
4,0	212,77	671	23,97	5 959	18,34	7 788	0,055	2 618 061
4,5	256,41	627	35,93	4 471	27,92	5 754	0,096	1 675 923
5,0	283,98	629	39,05	4 571	31,53	5 661	0,137	1 301 295

Для наглядности ниже на рисунке 2 приведен график зависимости коэффициента вязкости песчаного грунта η от значения нагрузки F при различных значениях обжимающего давления σ . На рисунке 3 представлены графики зависимости коэффициента вязкости песчаного грунта η от значения обжимающего давления σ при различных значениях действующей нагрузки F .

Анализируя график зависимости коэффициента вязкости η от действующей нагрузки F (рис. 2), наглядно прослеживается наличие нелинейной экспоненциальной зависимости вида (2).

$$\eta = \delta \cdot e^{-\xi \cdot \tau_i}, \quad (2)$$

где δ и ξ – коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.

Рассматривая график зависимости коэффициента вязкости η от значения обжимающего давления σ также наглядно прослеживается наличие нелинейной экспоненциальной зависимости, имеющий вид (3).

$$\eta = \psi \cdot e^{\lambda \cdot \sigma_m}, \quad (3)$$

где ψ и λ – коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.

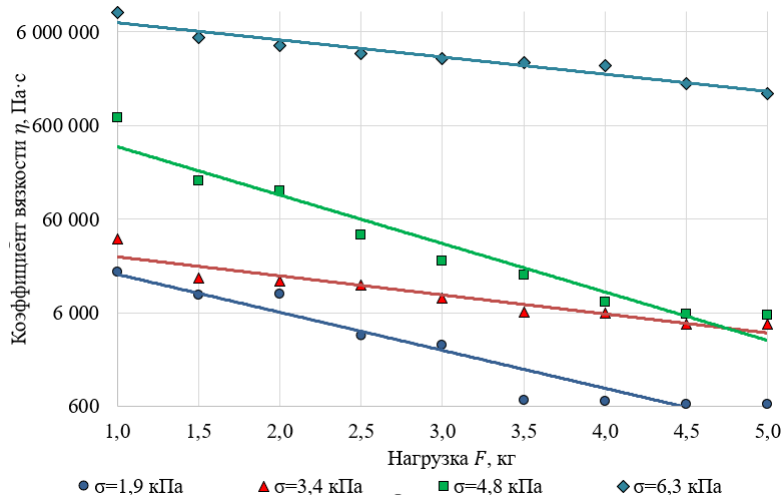


Рис. 2. График зависимости коэффициента вязкости η от значения нагрузки F при различных значениях обжимающего давления σ (вертикальная шкала приведена в логарифмическом масштабе)

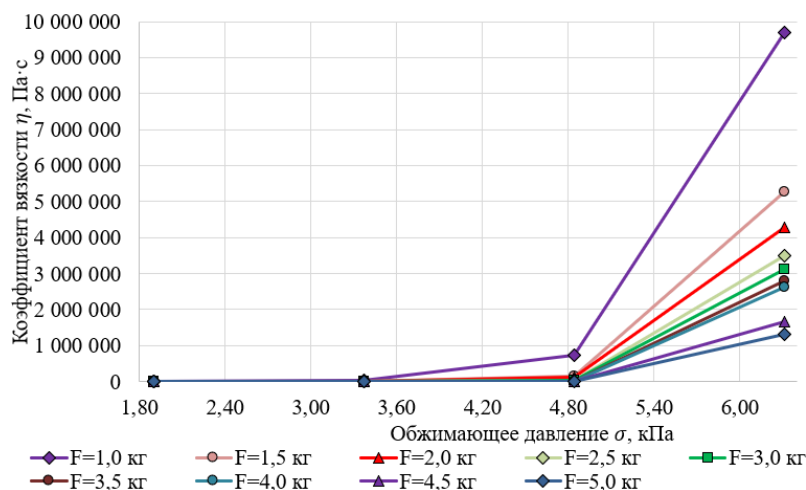


Рис. 3. График зависимости коэффициента вязкости η от значения обжимающего давления σ при различных значениях нагрузки F

Таким образом, принятая гипотеза о том, что коэффициент вязкости дисперсной среды под действием вибраций увеличивается с ростом среднего напряжения и уменьшается с ростом интенсивности касательных напряжений, нашла экспериментальное подтверждение. Следует перейти от абстрактных математических зависимостей (2) и (3) к более специальной зависимости с символьной записью механики грунтов. Совокупность выдвинутых и нашедших подтверждение гипотез позволяет использовать вид дробно-линейной функции [17], которая учитывает уровень интенсивности касательных напряжений и среднего напряжения (4).

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{\tau_i^* - \tau_i}{\tau_i} \quad \tau_i^* = \sigma_m \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

где η_0 – начальное значение коэффициента вязкости; τ_i – интенсивность касательных напряжений; τ_i^* – предельное значение касательных напряжений; σ_m – среднее напряжение; φ – угол внутреннего трения песчаного грунта.

Зафиксированное явление требует более детального теоретического описания. Ранее исследователями были изложены два

противоположных мнения в части влияния вибрации на сопротивление песчаных грунтов сдвигу: часть исследователей пришла к выводу, что динамическая нагрузка не приводит к изменению истинного угла внутреннего трения, и снижение сопротивления сдвигу наблюдается исключительно в связи с уменьшением нормального давления, действующего перпендикулярно площадке сдвига [2, 4, 5], а другая часть ученых пришла к выводу о том, что динамическое воздействие приводит к снижению сцепления в следствие изменения истинного угла трения, и дополнительные деформации возникают даже в случае, если напряжения не превышают предельных значений [3, 11].

Объем песчаного грунта состоит из частиц, контактирующих между собой, и на контакте между частицами возникают нормальные N_i и касательные Q_i силы (рис. 4). Данные контактные силы формируются за счет статической и динамической нагрузок, действующих на грунт.

Соответственно, в любой момент времени частица грунта находится в состоянии равновесия, если действующие сдвиговые усилия на

контактах и превышают силы трения, формируемые нормальными контактными силами (рис. 5,а). При этом нормальные контактные силы формируются преимущественно за счет средних напряжений, а касательные силы – преимущественно за счет интенсивности касательных напряжений. Если условие прочности на контакте нарушается, происходит смещение частицы до восстановления состояния равновесия – гранулы проскальзывают и / или перекатываются в новое положение. При нарушении условия равновесия на контактах группы частиц происходит их общее смещение, и формируется сдвиговая деформация (рис. 5,б, красным цветом для наглядности выделены контакты между зернами).

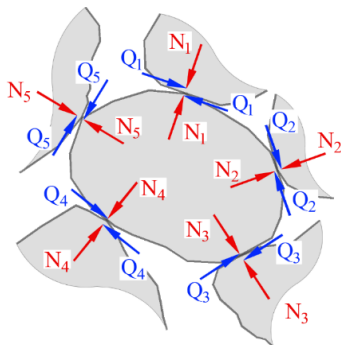


Рис. 4. Схема взаимодействия между частицами грунта

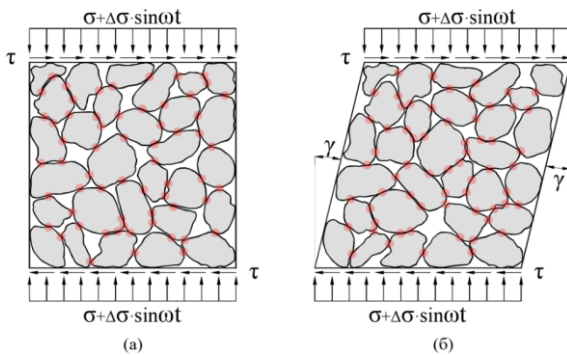


Рис. 5. Схема сдвиговой деформации при вибрационном воздействии

при рассмотрении на уровне отдельных частиц грунта

Песчаный грунт состоит из частиц различного размера и формы, что приводит к возникновению различных значений нормальных и касательных сил на контактах между гранулами – на одних зернах формируются значения усилий больше, а на других – усилия меньше. Кроме того, при динамическом воздействии усилия на контактах между частицами грунта изменяются во времени за счет динамической составляющей нагрузки. Следовательно, условие прочности контакта частиц между собой и равновесия частицы может быть нарушено в отношении большего или меньшего количества частиц. Отсюда можно заключить, что интенсивность угловой

деформации песчаного грунта при действии вибрации, обусловленная взаимным смещением зерен песка, становится больше в случае потери равновесия большего количества таких зерен.

Соответственно, чем большее значение принимает интенсивность касательных напряжений, тем больше становятся касательные усилия на контактах между частицами грунта, тем большее количество частиц теряет равновесие и смещается, и тем более интенсивно протекает угловая деформация, что находит отражение в снижении коэффициента вязкости (см. рис. 2): абсолютно точно наблюдалось, чем больше было усилие, проталкивающее шарик через образец песчаного грунта и формирующее касательные напряжения в его теле, тем быстрее перемещался шарик через рассматриваемую среду с нелинейной зависимостью, что соответствует более низкому значению ее коэффициента вязкости. Наконец, чем большее значение принимает среднее напряжение в грунте, тем больше становятся нормальные контактные силы, удерживающие частицы в состоянии равновесия, тем меньшее количество частиц теряет равновесие и смещается, и тем менее интенсивно протекает угловая деформация, что проявляется в явно выраженном увеличении коэффициента вязкости (см. рис. 3): действительно, чем сильнее было обжатие образца песчаного грунта, создаваемое пружинной группой, тем медленнее при прочих равных условиях перемещался шарик сквозь рассматриваемую среду, что соответствует более высокому значению ее коэффициента вязкости.

Выводы

По результатам серии экспериментов на грунтовом динамическом шариковом вискозиметре (патент № RU 2 775 356 C1) установлено, что увеличение среднего напряжения и уменьшение интенсивности касательных напряжений приводят к увеличению коэффициента вязкости песчаного грунта при действии вибрации. Зависимости в отдельности носят нелинейный экспоненциальный характер, а в совокупности могут быть объединены в виде дробно-линейной функции. Результаты натурно полученных результатов нашли теоретическое объяснение при рассмотрении песчаного грунта на уровне равновесия отдельных гранул: рост касательных напряжений приводит к увеличению касательных сил на контакте между частицами грунта, что способствует потере равновесия большей группе частиц и более интенсивному протеканию угловых деформаций, а увеличение среднего напряжения, наоборот, способствует росту удерживающих сил трения на контакте частиц, препятствует потере их равновесия и замедляет протекание угловой деформации элементарного объема грунта.

Список литературы

1. Баркан Д. Д. Экспериментальные исследования вибровязкости грунта / Д. Д. Баркан // ЖТФ. – 1948. – Т. 8, вып. 5. – С. 701–706.



2. Блехман И. И. Вибрационное перемещение / И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе. – М. : Наука, 1964. – С. 308–315.
3. Ершов В. А. Влияние уличного транспорта на осадку зданий / В. А. Ершов, А. А. Романов // Вопросы инженерной геологии Ленинградского экономического района. – Ленинград : Центр. бюро техн. информации, 1960. – 198 с.
4. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов : учебник / П. Л. Иванов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1991. – 447 с.
5. Иванов П. Л. Разжижение и уплотнение несвязных грунтов при динамических воздействиях : уч. пос. / П. Л. Иванов. – Ленинград : ЛПИ им. М. И. Калинина, 1978. – 52 с.
6. Купчикова Н. В. Экспертиза геоподосновы, оснований и фундаментов: современные приборы и оборудование при проведении экспериментальных исследований и геотехнического мониторинга / Н. В. Купчикова, А. С. Таркин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 4 (38). – С. 47–55.
7. Патент № RU 2 775 356 С1. Российская Федерация, МПК G01N 11/10 (2006.01). Грунтовый динамический шариковый вискозиметр : № 2021128334: заявл. 28.09.2021: опубл. 29.06.2022 / З. Г. Тер-Мартirosян, А. Н. Шебуняев, И. Е. Демин; заявитель НИУ МГСУ. – 6 с.
8. Пятецкий В. М. Современные фундаменты машин и их автоматизированное проектирование / В. М. Пятецкий, Б. К. Александров, О. А. Савинов. – Москва : Стройиздат, 1993. – 415 с.
9. Савинов О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет / О. А. Савинов. – Москва : Стройиздат, 1964. – 346 с.
10. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н. А. Слезкин. – Москва : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. – 521 с.
11. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов в высотном строительстве с развитой подземной частью : уч. пос. / З. Г. Тер-Мартirosян, А. З. Тер-Мартirosян. – Москва : АСВ, 2020. – 946 с.
12. Тер-Мартirosян З. Г. Ползучесть и виброползучесть песчаных грунтов / З. Г. Тер-Мартirosян, А. З. Тер-Мартirosян, Е. С. Соболев // Инженерные изыскания. – 2014. – № 5–6. – С. 24–28.
13. Шебуняев А. Н. Обзор результатов исследований влияния колебаний на физико-механические свойства песчаных грунтов / А. Н. Шебуняев // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 3 (41). – С. 15–22. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-41-3-15-22.
14. Barkan D. D. Dynamics of Bases and Foundations / D. D. Barkan ; translated from the Russian by L. Drashevskaya, and translation edition edited by G. S. Tschebotarioff. – New York : McGraw-Hill Book Co, 1962. – 434 p.
15. Ilyichev V. A. Experimental study of sand soil vibrocreeping / V. A. Ilyichev, V. I. Kerchman, B. I. Rubin, V. M. Piatetsky // International Symposium on Soil under Cyclic and Transient Loading. – Swansea, 1980. – Pp. 239–245.

© З. Г. Тер-Мартirosян, А. Н. Шебуняев, И. Е. Демин

Ссылка для цитирования:

Тер-Мартirosян З. Г., Шебуняев А. Н., Демин И. Е. Влияние напряженного состояния песчаного грунта на интенсивность виброползучести // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2023. № 1 (43). С. 10–14.

УДК 691.3

DOI 10.52684/2312-3702-2022-42-4-14-20

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙТРАЛИЗАТОРОВ ЭМИССИИ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ В СЕРОАСФАЛЬТОБЕТОНЕ

Ле Хью Туан, Ву Нгок Туен, С. Р. Меликсетян

Ле Хью Туан, соискатель, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел.: + 7 (812) 316-00-84; e-mail: huutuan1511@gmail.com;

Ву Нгок Туен, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры фундаментального образования, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7 (495)-287-49-14, доб. 1751; e-mail: ngostuyennnd91@gmail.com;

Меликсетян Сергей Романович, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Msr080802@mail.ru

Исследование сероасфальтобетона с модификаторами показало, что их применение снижает количество эмиссии газов, а также дает возможность справиться с проблемой экологического характера при использовании сероасфальтобетонной смеси. Для определения химических реакций, которые могут протекать на различных этапах производства и эксплуатации сероасфальтобетона используется термодинамический расчет. Результаты данного расчета также указывают на то, что в процессе изготовления модификатора на основе серы и нейтрализаторов происходят реакции, которые снижают эффективность нейтрализации. Для предотвращения указанного недостатка необходимо использовать компоненты для разделения границы «сера – нейтрализатор». Применение нейтрализаторов обеспечивает производство сероасфальтобетонных смесей, которые соответствуют требованиям санитарной и гигиенической безопасности, а это дает возможность применять сероасфальтобетон более масштабно, а также повысить срок службы дорог и их качество.