

УДК 625.856

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ЩМА С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ «АРМИДОН»

Ястремский Д.А., Чепур П.В., Абайдуллина Т.Н.
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
Тюмень, e-mail: yaster.dmitry@yandex.ru, chepur@me.com

В данной работе был исследован щебеночно-мастичный асфальтобетон с применением стабилизирующей добавки «АРМИДОН» на целлюлозной основе. Решена задача на основе метода конечных элементов, реализуемая в ПК ANSYS. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния автодорожного покрытия, изготовленного с применением данной добавки. В результате численных расчетов были получены максимальные и минимальные значения напряжений в зонах воздействия на конструкцию, области возникновения пластических деформаций в искусственном и грунтовом основаниях, позволяющие прогнозировать деформационные процессы при многократном приложении колесной нагрузки от движения автомобилей. Были получены результаты статических напряжений в дорожной одежде. В результате расчетов многослойной дорожной конструкции МКЭ, реализованной в программном комплексе ANSYS 16.0, также были получены изополя перемещений и действующих эквивалентных напряжений.

Ключевые слова: упруго-пластическая модель, метод конечных элементов, расчёт, щебеночно-мастичный асфальтобетон, деформирование

NUMERICAL SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF ROAD COVERING OF THE SMA WITH THE USE OF STABILIZING ADDITIVES «ARMIDE»

Yastremskiy D.A., Chepur P.V., Abaydullina T.N.
Industrial University of Tyumen, Tyumen, e-mail: yaster.dmitry@yandex.ru, chepur@me.com

In this work, we have investigated the stone mastic asphalt concrete with the use of a stabilizing additive «ARMIDE» on pulp basis. Solved the problem based on the finite element method implemented in ANSYS PC. The analysis of stress-strain state of road covering, manufactured with the use of this additive. In the numerical calculations were the maximum and minimum stress values in areas of impact on the design, the development of plastic deformations in the artificial soil and the basis on which to predict deformation processes by repeated application of wheel loads from traffic. Obtained results of static stress in the road pavement. The result of the calculation of multi-layered road structure FEM implemented in the software package ANSYS 16.0, were also obtained isopole movements and the current equivalent stress.

Keywords: elastic-plastic model, finite element method, calculation, stone mastic asphalt, deformation

С каждым годом увеличивается интенсивность движения и средняя величина нагрузки на ось грузовых автомобилей [15]. Действующие нормативно-технические документы [2, 4], регламентирующие предельные нагрузки на дорожные основания и покрытия, не соответствуют современным условиям эксплуатации. Поэтому возникает необходимость совершенствования как самих технических регламентов, ГОСТов, СНиПов, так и методов проектирования, строительства, ремонта и реконструкции автодорог. Одним из направлений по повышению эксплуатационных показателей асфальтобетонных покрытий является разработка новых добавок, составов, которые бы позволили повысить прочностные свойства дорожных покрытий без отклонения от действующих нормативно-технических документов.

Как в России, так и за рубежом большую популярность имеет щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) [6], который являет-

ся разновидностью асфальтобетона, отличающейся повышенной каркасностью. По сравнению со смесями, приготовленными по ГОСТ 9128-2013, ЩМА имеет повышенное содержание битума (5,5–7,5%) и щебня (70–90%) [14], формирующего прочный скелет, позволяет повысить водо-, морозостойкость, трещиностойкость, устойчивость к старению материала.

ЩМА не может использоваться без стабилизирующих добавок. Как показала практика, от качества стабилизирующей добавки зависит качество и долговечность ЩМА. Их структурирующее действие позволяет гомогенизировать смесь, предотвращая сегрегацию и стекание (отслоение) битумного вяжущего при высоких температурах [5]. В данной работе была использована стабилизирующая добавка «АРМИДОН» на целлюлозной основе. Нами была поставлена задача на основе метода конечных элементов, реализуемого в ПК ANSYS [7-8, 10–13],

выполнить анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) автодорожного покрытия, изготовленного с применением данной добавки.

Для расчета НДС элементов дорожного полотна необходимо определить физико-механические свойства всех конструктивных слоёв дорожной одежды и основания, для чего была изготовлена серия образцов для каждого конструктивного слоя и проведены испытания этих образцов в соответствии с нормативной документацией [1, 3], определялись следующие параметры: средняя плотность, водонасыщение, сдвигоустойчивость, трещиностойкость, предел прочности на сжатие, определение удельного сцепления, угла внутреннего трения, модуля деформации и коэффициента Пуассона. Для установления действующих эквивалентных напряжений и деформаций в покрытии при максимальных эксплуатационных нагрузках использована модель упруго-пластического деформирования материала – Друкера – Прагера (DP). Модель DP задается уравнением

$$\sqrt{J_2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sin \varphi}{(3 \pm \sin \varphi)} I_1 - \frac{2\sqrt{3}c \cos \varphi}{(3 \pm \sin \varphi)} = 0, \quad (1)$$

где J_2 – второй инвариант девиаторной части тензора напряжений; I_1 – первый инвариант тензора напряжений; c – удельное сцепление; φ – угол внутреннего трения.

Данный критерий игнорирует влияние инварианта J_3 (вводимого углом Лоде θ) на форму сечения. Он может рассматриваться как первая попытка аппроксимировать критерий Мора – Кулона гладкой функцией на основе инвариантов I_1 и J_2 в сочетании с двумя постоянными материала. В связи с трудоёмкостью вычисления аналитическим путём граничных условий, характерных для дорожного покрытия, как правило, труднодостижимо. Среди различных численных методов механики сплошной среды наиболее совершенным является *метод конечных элементов* [9].

Для составления общей системы уравнений равновесия всей конечно-элементной модели твердого деформируемого тела используются условия равновесия узлов или вариационные принципы и методы невязок. Для задач статики уравнение в общем виде выглядит следующим образом:

$$[K]\{U\} = \{P\} + \{P\}^q + \{P\}^g + \{P\}^{\varepsilon 0} + \{P\}^{\sigma 0}, \quad (2)$$

где $[K]$ – глобальная матрица жесткости КЭ модели; $\{U\}$ – глобальный вектор, определяющий узловые перемещения элемента; $\{P\}$ – глобальный вектор заданных внешних узловых сил; $\{P\}^q$, $\{P\}^g$, $\{P\}^{\varepsilon 0}$, $\{P\}^{\sigma 0}$ – векторы узловых сил.

Компоненты матрицы $[K]$ являются коэффициентами жесткости модели, они вычисляются путем суммирования соответствующих коэффициентов жесткости КЭ.

Нами была решена задача с помощью МКЭ в программном комплексе ANSYS 16.0. На конкретном примере было смоделировано земляное полотно для II категории дороги с капитальным дорожным покрытием под воздействием четырёхколёсного автомобиля с максимально возможной нагрузкой на ось в 130 кН согласно [4]. Для определения напряженно-деформированного состояния элементов дорожного полотна при действующих эксплуатационных нагрузках необходимо задать граничные условия конструкции.

В расчетной схеме (рис. 1) учитывается шарнирное закрепление боковых стенок основания с возможностью вертикальных подвижек частиц грунта. Подошву – нижнюю плоскость основания, в свою очередь, предлагается жёстко закрепить по всем степеням свободы.

Поперечные участки основания (вдоль направления движения) не закрепляются, так как предполагается, что нагрузка действует и за пределами расчетной области.

После назначения граничных условий и приложения действующих эксплуатационных нагрузок выполнялось разбиение модели на конечно-элементную сетку. Разбивка основания и покрытия дорожной одежды была выполнена в условиях пространственной деформации с использованием конечных элементов в форме четырехугольных призм. При создании физической модели основания и дорожного полотна под нагружением использованы конечные элементы: SOLID186, SOLID187, SHELL181, CONTA174, TARGE170, SURF154.

Физико-механические характеристики слоёв, принятые в расчётах, представлены в таблице.

Решение системы дифференцированных уравнений выполнялось методом итераций Ньютона – Рафсона. Сходимость решения оценивалась по узловым усилиям с точностью 0,001.

В результате расчетов многослойной дорожной конструкции МКЭ, реализованной в программном комплексе ANSYS 16.0, получены изополя перемещений (рис. 2, 3) и действующих эквивалентных напряжений (рис. 4).

В результате решения поставленной задачи было определено, что при максимальной прикладываемой нагрузке деформация составит 5 см, а максимальные напряжения, возникающие во втором слое асфальтобетона, составляют 1,5 МПа.

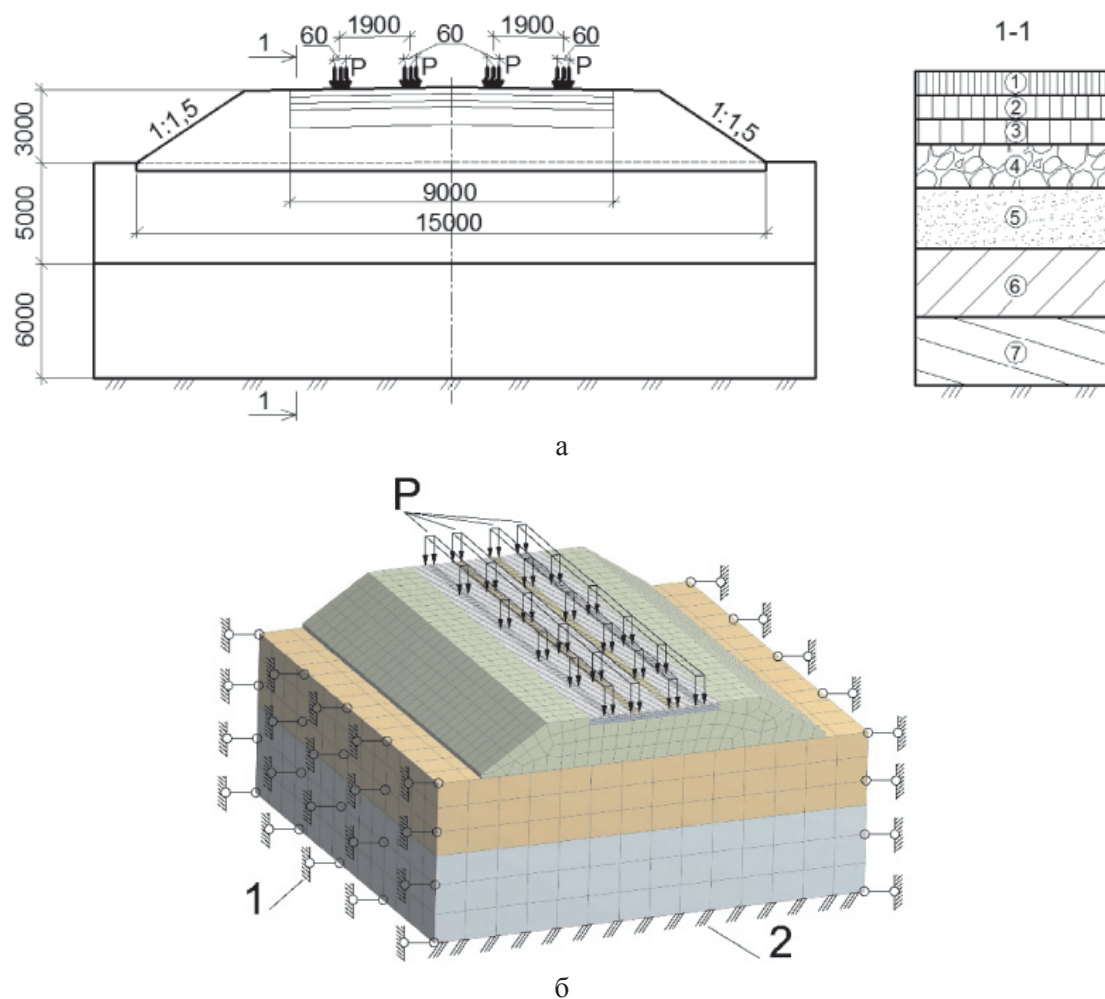


Рис. 1. Расчётная схема:

a – упруго-пластическая модель системы многослойного дорожного покрытия – грунтовое основание:
 1 – щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА-20) – 0,05 м; 2 – асфальтобетон пористый I марки из крупнозернистой смеси – 0,07 м; 3 – асфальтобетон пористый I марки из крупнозернистой смеси – 0,06 м; 4 – щебеночное основание – 0,34 м; 5 – песок крупный – 2,48 м;
б – суглинок тугопластичный – 5,0 м; 7 – суглинок полутвёрдый – 6,0 м;
 б – 1 – шарнирное закрепление боковых стенок основания;
 2 – жесткое закрепление нижней плоскости основания;
 P – действующая эксплуатационная нагрузка на дорожное полотно, распределенная по колёям

Физико-механические характеристики конструктивных слоёв

№ п/п	Параметры	ЩМА-2	Асфальтобетон пористый I марки (2слоя)	Щебеночное основание, уложенное методом расклиновки	Песок крупный	Суглинок тугопластичный	Суглинок полутвёрдый
1.	Модуль деформации, МПа	–	–	350	50	32	34
2.	Коэффициент Пуассона	0,5	0,5	0,2	0,25	0,35	0,35
3.	Плотность, кг/м³	2,42	2,31	1800	1760	1970	1970
4.	Удельное сцепление, кПа	0,21	0,18	1	2	39	47
5.	Угол внутреннего трения, град.	0,94	0,93	70	43	24	26
6.	Предел прочности при сжатии, МПа	1,5	1,23	–	–	–	–
7.	Трещиностойкость, МПа	2,9	2,6	–	–	–	–

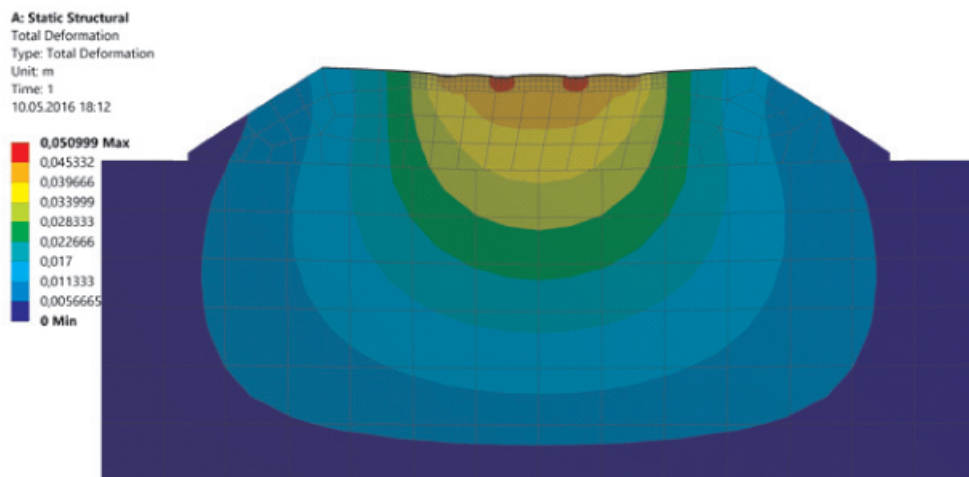


Рис. 2. Распределение деформаций (профиль) – масштаб деформаций $\times 10$

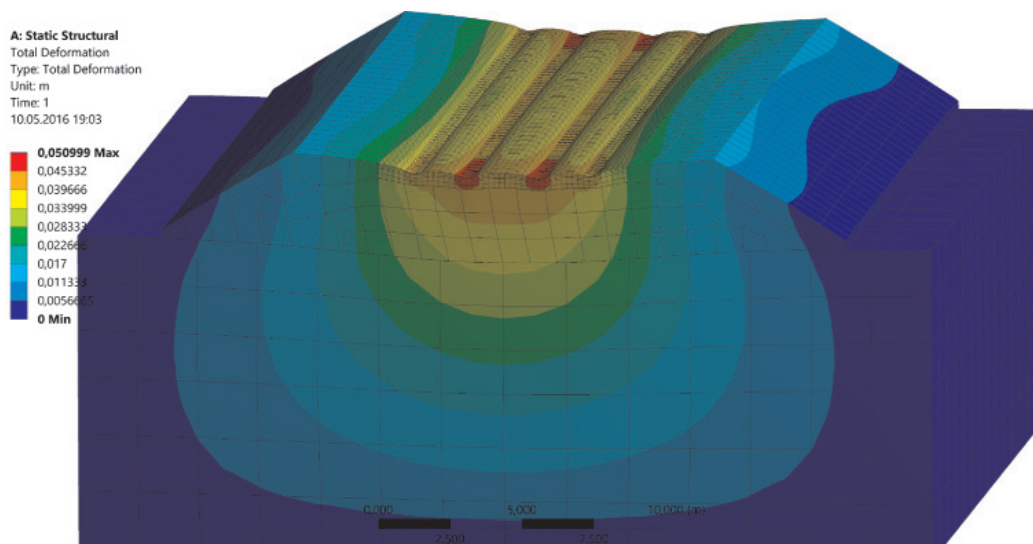


Рис. 3. Распределение деформаций для всего участка – масштаб деформаций $\times 20$

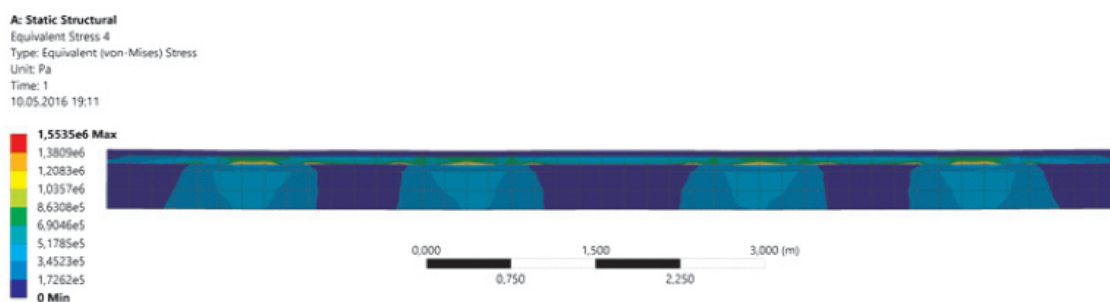


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений в верхнем слое дорожного полотна – масштаб деформаций $\times 20$

Это объясняется тем, что верхний слой выполнен из ЦМА, который является слоем износа, и все нагрузки, действующие на него, передаются нижним слоям дорожного покрытия.

Выводы

В результате численных расчетов были получены максимальные и минимальные значения напряжений в зонах воздействия на конструкцию, области возникновения

пластических деформаций в искусственном и грунтовом основаниях, позволяющие прогнозировать деформационные процессы при многократном приложении колесной нагрузки от движения автомобилей. Были получены результаты статических напряжений в дорожной одежде.

Для оценки долговечности дорожного покрытия необходимо также определить усталостные деформации, зная которые, возможно будет установить количество циклов приложения расчётной нагрузки и спрогнозировать срок службы дорожной одежды в зависимости от интенсивности движения.

Список литературы

1. ГОСТ 31015-2002. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетоны щебеночно-мастичные. Технические условия. – 2003-05-01. – М.: МНТКС, 2003. – 32 с.
2. ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения и габариты приближения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 9 с.
3. ГОСТ 12801-98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – М.: МНТКС, 1998.
4. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. – М.: Информавтор, 2001. – 116 с.
5. Кирюхин Г.Н., Балашов С.Ф., Сокальская М.Б. Устройство слоев износа из горячих щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей // Труды СоюздорНИИ. Юбилейный выпуск. – М., 2001. – С. 76–84.
6. Костин В.И. Щебеночно-мастичный асфальтобетон для дорожных покрытий: учебное пособие по курсу «Новые технологии в дорожном строительстве» для студентов специальности 270205 – «Автомобильные дороги и аэродромы» и слушателей системы дополнительного профессионального образования. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2009. – 65 с.
7. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Грученкова А.А., Соколов С.С. Оценка влияния трубопроводов системы подслоного пожаротушения на напряженное состояние резервуара при осадке основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–8. – С. 1698–1702.
8. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Тарасенко Д.А. Численное моделирование процесса деформирования резервуара при развитии неравномерных осадок // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 88–91.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
10. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Особенности совместной работы резервуара и устройств размыва донных отложений винтового типа // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–8. – С. 1671–1675.
11. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Создание и верификация численной модели резервуара РВСПК-50000 // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7–1. – С. 95–100.
12. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Грученкова А.А., Антонов И.В. Численный анализ влияния жесткости газоуравнительной системы при развитии осадок резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–6. – С. 1292–1296.
13. Чирков С.В., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Определение оптимального количества тросов поддержки днища при подъеме резервуара // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 5. – С. 72–78.
14. Ястремский Д.А., Абайдуллина Т.Н., Пахомов И.А. Изучение вида и типа стабилизирующих добавок в ЦМА смесях // Сборник материалов XV научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов, соискателей и магистрантов ТюмГАСУ 2015. – С. 213–218.
15. Ястремский Д.А., Абайдуллина Т.Н., Чепур П.В., Проблема повышения долговечности асфальтобетонного покрытия и пути её решения // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 3–2. – С. 307–310.

References

1. GOST 31015-2002. Smesi asfaltobetonnye i asfaltobetonny shhebenочно-mastichnye. Tehnicheskie uslovija. 2003-05-01. M.: MNTKS, 2003. 32 p.
2. GOST R 52748-2007. Dorogi avtomobilnye obshhego polzovanija. Normativnye nagruzki, raschjotnye shemy nagruzhennija i gabarity priblizhenija. M.: Standartinform, 2008. 9 p.
3. GOST 12801-98. Materialy na osnove organicheskikh vjazhushhih dlja dorozhnogo i ajerodromnogo stroitelstva. Metody ispytaniy. M.: MNTKS, 1998.
4. ODN 218.046-01. Proektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd. M.: Informavtodor, 2001. 116 p.
5. Kirjuhin G.N., Balashov S.F., Sokalskaja M.B. Ustrojstvo sloev iznosa iz gorjachih shhebenочно-mastichnyh asfaltobetonnyh smesey // Trudy SojuzdorNII. Jubilejnyy vypusk. M., 2001. pp. 76–84.
6. Kostin V.I. Shhebenочно-mastichnyy asfaltobeton dlja dorozhnyh pokrytij: uchebnoe posobie po kursu «Novye tehnologii v dorozhnom stroitelstve» dlja studentov specialnosti 270205 «Avtomobilnye dorogi i ajerodromy» i slushatelej sistemy dopolnitelnogo professionalnogo obrazovanija. N. Novgorod: NNGASU, 2009. 65 p.
7. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Gruchenkova A.A., Sokolov S.S. Ocenka vlijanija truboprovodov sistemy podslonogo pozharotushenija na naprjazhennoe sostojanie rezervuara pri osadke osnovanija // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–8. pp. 1698–1702.
8. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Tarasenko D.A. Chislennoe modelirovanie processa deformirovanija rezervuara pri razvitii neravnomernykh osadok // Neftjanoe hozjajstvo. 2015. no. 4. pp. 88–91.
9. Fadeev A.B. Metod konechnykh jelementov v geomehanike. M.: Nedra, 1987. 221 p.
10. Chepur P.V., Tarasenko A.A. Osobennosti sovmestnoj raboty rezervuara i ustrojstv razmyva donnykh otlozhenij vintovogo tipa // Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 2–8. pp. 1671–1675.
11. Chepur P.V., Tarasenko A.A. Sozdanie i verifikacija chislennoj modeli rezervuara RVSPK-50000 // Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 7–1. pp. 95–100.
12. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Gruchenkova A.A., Antonov I.V. Chislennyj analiz vlijanija zhestkosti gazouravnitelnoj sistemy pri razvitii osadok rezervuara // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–6. pp. 1292–1296.
13. Chirkov S.V., Tarasenko A.A., Chepur P.V. Opredelenie optimalnogo kolichestva trosov podderzhki dnishha pri podeme rezervuara // Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Neft i gaz. 2014. no. 5. pp. 72–78.
14. Jastremskij D.A., Abajdullina T.N., Pahomov I.A. Izuchenie vida i tipa stabilizirujushhih dobavok v ShhMA smesjah // Sbornik materialov XV nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh uchjonyh, aspirantov, soiskatelej i magistrantov TjumGASU 2015. pp. 213–218.
15. Jastremskij D.A., Abajdullina T.N., Chepur P.V., Problema povyshenija dolgovechnosti asfaltobetonnoho pokrytija i puti ejo reshenija // Sovremennye naukojomkie tehnologii. 2016. no. 3–2. pp. 307–310.