

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 624.131:624.15

*ГРУЗИН ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
gruzinvv@mail.ru*

*Национальный университет обороны имени Первого Президента
Республики Казахстан – Лидера Нации (НУО),*

Республика Казахстан, 000001, г. Астана, пр. Туран, 72

*ИЩЕНКО АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
ishchenko_60@mail.ru*

*СМИРНОВ ВЯЧЕСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ, ст. преподаватель,
kafedra_sdm@mail.ru*

*Карагандинский государственный технический университет,
Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56*

ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИМПУЛЬСНОМУ НАГРУЖЕНИЮ ГРУНТА МОДЕЛЯМИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

В статье представлено обоснование методики проведения экспериментальных исследований импульсного взаимодействия модели рабочего органа с грунтом с применением специализированного программно-аппаратного комплекса, оснащенного скоростной цифровой видеокамерой. Для обеспечения требуемых параметров визуализации процесса импульсного воздействия на грунт представлена структурная схема последовательности выбора и расчёта параметров модели, стенда и специализированного оборудования для скоростной съёмки, а также выполнены обоснование и расчёт их параметров. Осуществлена настройка экспериментального оборудования, проведены пробные эксперименты с применением скоростной цифровой видеокамеры, выполнена интегральная оценка точности экспериментальных исследований.

Ключевые слова: методика; модель; рабочий орган; импульсное нагружение; стенд; грунт; технология; подготовка уплотнённых оснований; свайный фундамент.

VLADIMIR V. GRUZIN, DSc, Professor,

gruzinvv@mail.ru

KAZGUU University,

72, Turan Ave., 000001, Astana, Kazakhstan

ALEKSANDR P. ISCHENKO, PhD, A/Professor,

ishchenko_60@mail.ru
VYACHESLAV M. SMIRNOV, Senior Lecturer,
kafedra_sdm@mail.ru
Karaganda State Technical University,
56, Bul'var Mira, 100027, Karaganda, Kazakhstan

EXPERIMENTAL TEST RESEARCH OF SOIL PULSE LOADING USING MEMBER MODELS

The paper presents justification of experimental research technique for pulse interaction between the model of member and the soil using a specialized hardware-software complex equipped with a high-speed video camera. The flowchart of sequential choice and design of the model parameters, test bench, and equipment for high-speed shooting provide the required visualization parameters of soil pulse loading. Also, the rationale for and calculation of their parameters are presented in this paper. The description is given for the adjustment of test equipment and experiments using a high-speed digital camera. The integrated estimation of test experiment accuracy is presented herein.

Keywords: methodology; model; member; pulse loading; test bench; soil; technology; condensed bases; piles foundation.

Современная практика строительной отрасли показывает, что все большее распространение получают такие технологии подготовки оснований и устройства фундаментов, которые позволяют существенно улучшить физико-механические свойства грунтов и значительно повысить несущую способность фундаментов по грунту основания. Это прогрессивные технологии возведения свайных фундаментов на уплотненном основании, которые реализуются с помощью специализированного оборудования, обеспечивающего [1, 2, 3, 4]:

- формование выемок в грунте ударными способами (вытрамбовыванием котлованов или пробивкой скважин);
- образование скважин круглого сечения бурением, раскатыванием или вдавливанием в условиях плотной городской застройки;
- раскатывание скважин с поперечным профильным сечением в виде треугольника или многоугольника;
- поверхностное уплотнение (трамбование) грунта;
- применение комбинированных способов и комплектов рабочих органов для усиления оснований и фундаментов зданий и сооружений.

Несущая способность таких фундаментов повышается за счет уплотнения грунта на его дневной поверхности в устье, а также по боковой поверхности и на дне отформованных выемок при погружении или извлечении рабочего органа специальной конструкции.

Для управления технологическим процессом уплотнения грунтовых оснований и назначения рациональных технико-технологических параметров ведения работ средствами механизации необходимо, в свете комплекса технологических требований фундаментостроения, знать не только качественное влияние и тенденции изменения пределов прочности и модулей деформации этих грунтов, но и их количественные значения в зависимости от их физико-механических свойств и характера нагружения рабочими органами.

В связи с изложенным, разработка и внедрение прогрессивных технологий ведения работ нулевого цикла на основе результатов исследований, выполненных с применением современных программно-аппаратных измерительных комплексов и технических средств, являются актуальными [3, 4].

Сведения, представленные в данной статье, получены в результате проведения работ по теме «Исследование сжимающих напряжений в грунте» (2012–2014 гг.), выполненной в рамках бюджетной программы Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Методика экспериментальных исследований сжимающих напряжений в грунте ориентирована на следующие моменты:

- использование скоростной видеосъемки для изучения поведения во времени системы «рабочий орган – грунт»;
- визуализация и бесконтактная регистрация движения модели рабочего органа в грунте с дискретностью между снятыми кадрами на порядок меньше длительности исследуемого процесса;
- минимизация влияния особенностей конструкции и параметров стенда на результаты эксперимента при исследовании в заданном диапазоне импульсов воздействия моделей на грунт;
- автоматизация обработки полученных видеоматериалов с целью получения данных о динамике исследуемого объекта;
- интегральная оценка и контроль точности проведения экспериментальных исследований и обработки полученных результатов;
- уменьшение материальных затрат, снижение трудоемкости выполнения экспериментальных исследований, а также сокращение сроков их проведения.

При обосновании и расчёте параметров специализированного стенда и моделей рабочего органа, а также технических характеристик регистрирующего оборудования учитывались (рис. 1): тип грунта, массогабаритные характеристики моделей рабочего органа, рекомендуемые импульсные воздействия рабочего органа на грунт [5, 6].

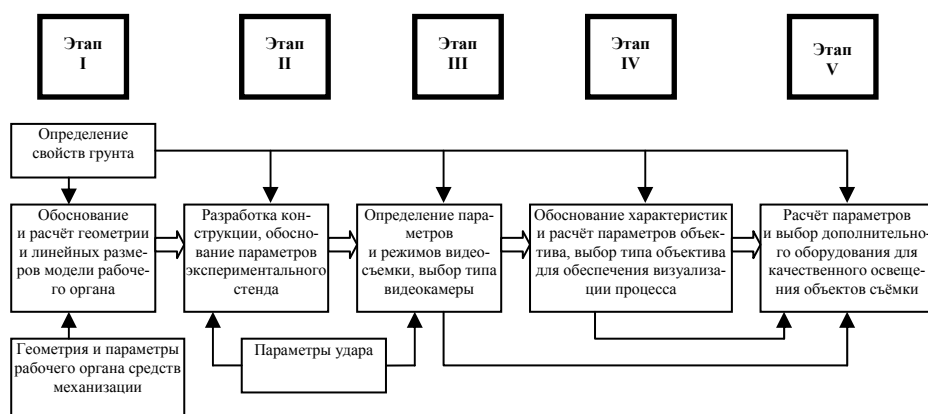


Рис. 1. Структурная схема формирования параметрических характеристик измерительного комплекса и технических средств

Достижения современной цифровой фото- и видеотехники позволяют с меньшими временными и ресурсными затратами осуществить процесс регистрации быстропротекающих процессов с последующей обработкой полученных данных с применением программно-аппаратных комплексов и информационных технологий.

Так как в научной литературе отсутствуют однозначные рекомендации по необходимому количеству кадров для качественной и количественной оценки ударного взаимодействия рабочих органов с грунтом, то было принято решение об использовании скоростной видеосъёмки, обеспечивающей регистрацию всей динамики процесса с дискретностью между отснятыми кадрами на порядок меньше длительности его протекания, которая составляет, согласно данным проф. Н.Я. Хархуты, от 10 до 95 мс [6].

То есть для регистрации движения модели в грунте необходимо обеспечить скоростную видеосъёмку с временной дискретностью 0,001 с. Таким образом, с учётом вышесказанного частота кадров видеосъёмки должна быть не менее 1000 кадр/с. Указанным ограничениям удовлетворяет скоростная цифровая видеокамера TMC-6740GE с максимальной частотой съёмки 1250 кадров/с (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид скоростной цифровой видеокамеры TMC-6740GE и объектива Navitar DO-5095:

1 – скоростная видеокамера TMC-6740GE; 2 – объектив Navitar DO-5095; 3 – ноутбук Lenovo Z61m; 4 – силовой кабель ноутбука; 5 – интерфейсный кабель cat5e; 6 – штатив; 7 – силовой кабель видеокамеры; 8 – источник автономного питания

В комплекте со скоростной цифровой видеокамерой TMC-6740GE поставляется специальное программное обеспечение, которое позволяет в про-

цессе экспериментальных исследований изменять следующие режимы ее работы: скорость съёмки, размер кадра, количество снимаемых кадров и режим записи данных.

Однако качество визуализации процесса взаимодействия моделей рабочих органов с грунтом и достоверность информации, полученной в результате обработки изображений, обеспечиваются не только характеристиками видеокамеры, но и характеристиками ее объектива.

В процессе обоснования и выбора параметров объектива видеокамеры были учтены следующие основные группы характеристик фото- и видеообъективов:

– конструктивные (оптические и механические) характеристики (например, переднее фокусное расстояние f , диаметр входного зрачка D , угловое поле в пространстве предметов 2ω и др.);

– фотометрические характеристики (например, коэффициент пропускания τ_0 и др.);

– характеристики качества изображения (например, угловая разрешающая способность ψ и др.).

Основная цель выбора и расчета параметров объектива скоростной цифровой видеокамеры – получение качественного изображения объекта пространственной формы с заданным линейным разрешением, при котором величина допустимого диаметра кружка нерезкости $d_{\text{доп}}$ удовлетворяет условию:

$$d_{\text{доп}} \leq d_m, \quad (1)$$

где d_m – линейный размер объекта наблюдения, м.

В представляемых исследованиях в качестве грунта использован песок средней крупности. Гранулометрический состав песка определен ситовым методом, и его физико-механические свойства представлены в таблице.

Физико-механические характеристики песчаного грунта, подвергнутого испытанию импульсным воздействием

Характеристика	Значение
Гранулометрический состав	Песок средней крупности. Размер частиц $d > 0,25$ мм с содержанием частиц по массе > 50 %
Коэффициент пористости – e	0,65
Удельное сцепление – c_n , кПа (кгс/см ²)	1 (0,01)
Угол внутреннего трения – j_n , град	35
Модуль деформации – E , МПа (кгс/см ²)	30 (300)
Весовая влажность – W , %	9,8
Объём испытуемого грунта, м ³	$7,1 \cdot 10^{-3}$

Так как в экспериментальных исследованиях используется песок средней крупности со средним размером частиц, не превышающим 0,38 мм, то регистрацию перемещения частиц грунта под действием внешней силы планируется выполнять с точностью до $d_m = d_{\text{доп}} = 0,1$ мм. При этом глубина резко изобра-

жаемого пространства (РИП) принимается равной диаметру – $\Delta p = 45$ мм. На основании вышеизложенных положений при проведении экспериментов предполагается использовать объектив Navitar DO-5095 (рис. 2).

Объектив Navitar DO-5095 имеет следующие основные характеристики:

- фокусное расстояние $f' = 50$ мм;
- диафрагменное число $K_r = 0,95-16$;
- угловое поле в пространстве предметов $2\omega(H \times V) = 14^\circ 36' \times 11^\circ 00'$.

С учетом этого последовательность проведения обработки результатов экспериментальных исследований и анализа полученных изображений представлена в виде схемы последовательности выполнения двух этапов: подготовительного этапа и этапа обработки кадра (рис. 3).

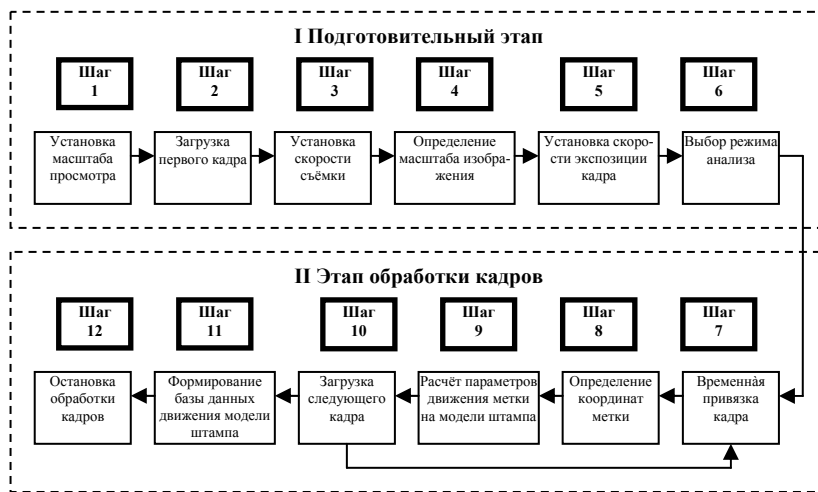


Рис. 3. Последовательность обработки кадров видеосъёмки в процессе экспериментальных исследований

Методика проведения экспериментальных исследований с применением скоростной видеокамеры представлена на рис. 4.



Рис. 4. Методика проведения экспериментальных исследований

Примерное содержание базы данных при проведении экспериментальных исследований влияния параметров удара на длительность удара и глубину погружения модели в грунт:

- импульс удара, кгм/с;
- масса модели, кг;
- скорость удара, м/с;
- глубина погружения, м;
- длительность по этапам исследования, мс.

Применение физического моделирования при исследовании рабочих процессов, связанных с взаимодействием рабочих органов машин с грунтом, приводит к уменьшению трудоемкости выполнения экспериментальных исследований. При этом линейные размеры модели рабочего органа навесного оборудования определяются на основании равенства [5]:

$$V = \frac{B \cdot H^2}{2 \operatorname{tg} \varphi}, \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта; B – линейный размер модели в вертикальной плоскости, м; H – линейный размер в горизонтальной плоскости, м; V – предельно допустимый объем грунта, взаимодействующего с рабочим органом вытрамбовывающего оборудования, в котором сохраняются характерные свойства разрабатываемой среды, м³.

Линейный размер, установленный по предельно допустимому объему грунта, взаимодействующего с рабочим органом вытрамбовывающего оборудования, в котором сохраняются характерные свойства разрабатываемой среды, обосновывается положением, что при числе компонентов, составляющих грунт $m \geq 400$, вероятность того, что в данном объеме содержится характерное количество определяющих структуру компонентов, близка к достоверности с вероятностью 0,98. Следовательно, искомый объем грунта может быть установлен по формуле

$$V \geq 200 \cdot d^3, \quad (3)$$

где d – линейный размер случайных включений для модели грунта, м.

В первом приближении можно принять $\frac{B}{H}$ от 3 до 4 и, следовательно, можно считать, что

$$V \approx \frac{1}{18} B^3. \quad (4)$$

Масштабный коэффициент $k_l = \frac{l_n}{l_m}$ может быть установлен на основании следующей зависимости:

$$k_l \leq \frac{l_n}{15,4 \cdot d_{\max}}, \quad (5)$$

где l_n – определяющий линейный размер рабочего оборудования оригинала, м;
 d_{\max} – максимальный линейный размер минеральной фракции, м.

Таким образом, минимально допустимый линейный масштаб модели

$M_l = \frac{1}{k_l}$ будет равен

$$M_l^{\min} = 15,4 \frac{d_{\max}}{l_n}. \quad (6)$$

Как отмечено ранее, в качестве исходных данных для расчёта максимальных габаритов модели был выбран рабочий орган трамбуемой машины ТМ-3/2, высота которого составляет $l_n = 2$ м [1]. В качестве грунта планируется использовать песок средней крупности. Гранулометрический состав песка определён ситовым методом и представлен в таблице.

Как видно из приведённых данных, максимальный размер минеральной фракции $d_{\max} = 0,002$ м. Таким образом, максимальный масштабный коэффициент k_l равен

$$k_l^{\max} = \frac{l_n}{15,4 \cdot d_{\max}}, \quad (7)$$

$$k_l^{\max} = \frac{2}{15,4 \cdot 0,002} \cong 65.$$

Минимальный линейный размер модели соответственно равен

$$l_M^{\min} = \frac{l_n}{k_l^{\max}}, \quad (8)$$

$$l_M^{\min} = \frac{2}{65} \cong 0,031 \text{ м.}$$

Предельно допустимый объём грунта V , взаимодействующего с рабочим органом вытрамбовывающего оборудования, равен

$$V = \frac{B \cdot H^2}{2 \operatorname{tg} \varphi}, \quad (9)$$

$$V = \frac{0,065 \cdot 0,045^2}{2 \cdot \operatorname{tg} 35^\circ} \cong 9,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Приведенные выше расчеты позволяют определить минимально допустимые геометрические размеры моделей рабочих органов. В настоящих исследованиях правомочно использовались модели конической и цилиндрической форм (рис. 5).



Рис. 5. Модели рабочего органа:

1 – конус (300 г); 2 – направляющая с мерной линейкой; 3 – цилиндр (300 г); 4 – цилиндр (600 г)

В частности, коническая модель имеет следующие параметры:

- угол раствора конуса при вершине $\alpha = 38^\circ$;
- диаметр основания конуса $D = 45$ мм;
- объём конуса $V = 3,4 \cdot 10^{-5}$ м³.

Перед проведением экспериментов были выполнены настройка и апробация оборудования специализированного измерительного комплекса.

Для апробации методики применения, настройки и выбора рациональных управляющих параметров скоростной цифровой камеры ТМС-6740GE, а также проверки взаимодействия ее программного обеспечения с компьютерной системой были выполнены пробные эксперименты со скоростями съемки от 1000 до 1250 кадров/с.

На первом этапе одновременно со сбросом модели включалась скоростная видеокамера ТМС-6740GE, которая фиксировала движение модели с момента начала свободного падения до её полной остановки в грунте.

На втором этапе отснятые видеок кадры обрабатывались с помощью специальной программы.

На третьем этапе производилась оценка ошибки снятия параметров с последующей корректировкой итогового результата. Для уменьшения ошибки снятия размеров с каждого видеок кадра количество повторных обработок на компьютере с использованием программы составляло от 3 до 4 раз. Число повторных обработок было установлено на основании сравнения данных эксперимента с известным значением ускорения свободного падения.

На четвертом этапе выполнялся анализ данных, полученных в результате обработки цифровых кадров на втором и третьем этапах, и осуществлялось построение графиков изменения скорости конической модели (рис. 6) под действием сил гравитации (зона I) и сил сопротивления грунта (зона II).

Относительная погрешность определения ускорения свободного падения с помощью использованных методик регистрации и обработки данных составила 1,4 %.

Столь малая относительная погрешность определения величины ускорения свободного падения позволяет уверенно заявить об эффективности применения разработанной методики и программно-измерительного комплек-

са как при проведении экспериментов, так и для обработки результатов цифровой видеосъемки.

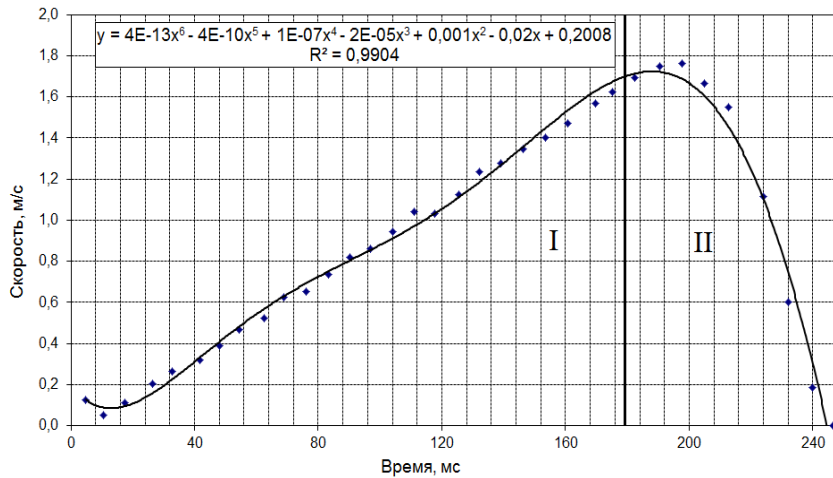


Рис. 6. Изменение скорости падения модели под действием гравитации

Выполненные тестовые исследования показали принципиальную возможность регистрации быстротекущих процессов комплектом измерительно-фиксирующего оборудования и обрабатывающего программного обеспечения на скоростях съемки до 1250 кадров/с.

С учетом данных тестирования были установлены следующие требования и ограничения к условиям съёмки, обеспечивающие более точную и качественную визуализацию проведения экспериментов:

- для правильной интерпретации перемещений движущихся объектов необходимо в плоскость съёмки вводить вертикально ориентированный эталон длины (например, мерную линейку с точностью измерения до 1 мм);

- для проведения съёмки достаточно естественного дневного освещения (в условиях стендовой регистрации достаточным является освещение от лампы накаливания мощностью 100 Вт с расстояния в 0,1 м);

- для надежной регистрации процесса экспериментально установлено необходимое количество снимаемых кадров в зависимости от скорости съёмки и типа исследуемого процесса (от 100 кадров для съёмки со скоростью 1250 кадров/с).

Таким образом, изложенные в данной статье результаты по методическому обеспечению экспериментальных исследований для определения параметров импульсного взаимодействия модели рабочего органа с грунтом служат решению важной научной проблемы и направлены на совершенствование технологий подготовки оснований и устройства фундаментов в сложных грунтовых условиях, на разработку научно обоснованной теории их применения, на создание инженерной методики выбора и расчета параметров технологических комплексов, что имеет несомненную актуальность и практическую ценность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абраменков, Э.А.* Средства механизации для подготовки оснований и устройства фундаментов: монография / Э.А. Абраменков, В.В. Грузин. – Новосибирск : Изд-во НГАСУ, 1999. – 215 с.
2. *Строительные машины и оборудование в фундаментостроении* / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, А.В. Грузин, В.В. Грузин. – Астана : Фолиант, 2011. – 296 с.
3. *Совершенствование технологий* усиления грунтовых оснований зданий и сооружений / В.В. Грузин, Д.А. Абраменков, А.В. Грузин, В.В. Угай // Известия вузов. Строительство. – Новосибирск. – 2014. – № 6. – С. 51–58.
4. *Абраменков, Д.Э.* Средства механизации и технология строительного производства: монография / Д.Э. Абраменков, А.В. Грузин, В.В. Грузин ; под общ. ред. д.т.н., проф. Э.А. Абраменкова. – Saarbrucken, Germany: Palmarium academic publishing, 2012. – 327 с.
5. *Баловнев, В.И.* Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М. : Высшая школа, 1981. – 335 с.
6. *Хархута, Н.Я.* Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н.Я. Хархута, Ю.М. Васильев. – М. : Транспорт, 1975. – 288 с.

REFERENCES

1. *Abramenkov E.A., Gruzin V.V.* Sredstva mekhanizatsii dlya podgotovki osnovanii i ustroistva fundamentov: monografiya [Mechanization techniques for preparation of bases and foundations. Monograph]. Novosibirsk : NGASU Publ., 1999. 215 p. (rus)
2. *Abramenkov D.E., Abramnikov E.A., Gruzin A.V., Gruzin V.V.* Stroitel'nye mashiny i oborudovanie v fundamentostroenii: uchebnik [Construction machinery in foundation]. Astana : Foliant Publ., 2011. 296 p. (rus)
3. *Gruzin V.V., Abramnikov D.A., Gruzin A.V., Ugai V.V.* Sovershenstvovanie tekhnologii usileniya gruntovykh osnovanii zdaniy i sooruzheniy [Improvement of strengthening technology of bases]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. Novosibirsk. 2014. No. 6. Pp. 51–58. (rus)
4. *Abramenkov D.E. Gruzin A.V., Gruzin V.V.* Sredstva mekhanizatsii i tekhnologiya stroitel'nogo proizvodstva: monografiya [Mechanization and technology of construction]. Saarbrucken, Germany : Palmarium Academic Publ., 2012. 327 p. (rus)
5. *Balovnev V.I.* Modelirovanie protsessov vzaimodeistviya so sredoi rabochikh organov dorozhno-stroitel'nykh mashin [Modeling of interaction between members of road machinery]. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1981. 335 p. (rus)
6. *Kharkhuta N.Ya. Vasil'ev Yu.M.* Prochnost'. ustoychivost' i uplotnenie gruntov zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog [Strength, stability, and compaction of pavements]. Moscow : Transport Publ., 1975. 288 p. (rus)