

Сравнительный анализ схем послойного уплотнения грунта при выполнении строительных работ

Т.А.Суэтина, МАДИ, Москва

Е.В.Марсова, МАДИ, Москва

Г.В.Кустарев, МАДИ, Москва

Ю.В.Борисов, МАДИ, Москва

Рассмотрены процессы послойного уплотнения грунтов при строительстве насыпных инженерных сооружений, возведённых методом непрерывного уплотнения. Показаны способы реализации этих процессов на основе двух технологических схем – эллиптической и челночной. Произведена оценка основных параметров при работе агрегатов по классической эллиптической схеме непрерывного уплотнения грунтов и по эллиптической схеме с использованием кольцевого метода разворота агрегата, когда в процессе возведения земляного полотна автомобильных и железных дорог движение уплотняющего агрегата производится от обочин к оси. Показано, что более эффективной и наименее критичной к топографическим и геометрическим параметрам рабочих площадок является челночная схема уплотнения, при которой уплотняющие машины совершают возвратно-поступательные движения, сопровождаемые боковым смещением на смежную рабочую полосу после достижения требуемой плотности на предыдущей полосе. Произведен анализ основных факторов, обосновывающих применение той или иной технологической схемы укатки. Проанализированы условия работы агрегатов в зависимости от типа используемого уплотняющего агрегата и принятой технологии производства работ по эллиптической и челночной схемам, реализация которых позволяет достичь наибольшего производственного эффекта.

Ключевые слова: уплотнение грунтов, уплотняющие машины, виброкатки, челночная схема, складывание агрегата, угол складывания

Comparative Analysis of Surface Plants of the Ground Sealing Composition in the Implementation of Construction Works

T.A.Suetina, MADI, Moscow

E.V.Marsova, MADI, Moscow

G.V.Kustarev, MADI, Moscow

Y.V.Borisov. MADI, Moscow

Processes of layer-by-layer consolidation of soil at construction of the bulk engineering constructions built by method of continuous consolidation are considered. Ways of realization of these processes on the basis of two technological schemes – elliptic and shuttle are shown. The assessment of key parameters is made during the operation of units on the classical elliptic scheme of continuous consolidation of soil and on the elliptic scheme with use of a ring method of a turn

of the unit when in the course of construction of a road bed automobile and the railroads the movement of the condensing unit is made from roadsides to an axis. It is shown that working platforms, more effective and least critical to topographical and geometrical parameters, the shuttle scheme of consolidation at which the condensing cars make the back and forth motions accompanied with lateral shift on an adjacent working strip after achievement of the demanded density on the previous strip is. The analysis of the major factors proving application of this or that technological scheme of soil consolidation is made. Operating conditions of units depending on type of the used condensing unit and the accepted production technology of works on elliptic and shuttle schemes which realization allows to reach the greatest production effect are studied

Keywords: soil consolidation, compacting machines, vibrating rolls, shuttle circuit, unit folding, folding angle.

Введение

В транспортном строительстве значительный удельный вес в общем объёме работ, наибольшую трудоёмкость и продолжительность имеют земляные работы. Эти работы выполняются с помощью мобильных строительных технологических агрегатов на базе различных колёсных и гусеничных тягачей. Сроки окончания строительства, долговечность и работоспособность завершённого инженерного сооружения в большей степени зависят от длительности и качества земляных работ, в которых определяющую роль играют работы по уплотнению отсыпанного грунта. Независимо от типа насыпных инженерных сооружений возведение каждого объекта или его фрагментов (при крупномасштабном строительстве) производится методом послойного наращивания. При этом в зависимости от типа строящегося объекта, геологических и топографических особенностей местности, на которой производится строительство, процесс уплотнения варьируется как по методике, так и по техническим средствам, которые, в свою очередь, определяют характер технологического процесса уплотнения грунтов.

Для наиболее эффективного использования технических средств для уплотнения грунтов необходимо согласование производительности машин и агрегатов, задействованных в технологическом комплексе. Причём, если процессы отсыпки и планировки грунта мало зависят от времени, а производительность работ по соответствующей технологической

карте стабильна, то характеристика процесса уплотнения во многом зависит от метода и схемы уплотнения грунта.

Наибольший объём работ по уплотнению грунтов при строительстве насыпных инженерных сооружений выполняется методом непрерывного укатывания грунта, который, в свою очередь, реализуется с помощью двух технологических схем – эллиптической и челночной. Каждая из этих схем даёт наибольший производственный эффект в зависимости от вида применяемого уплотняющего агрегата и принятой технологии производства работ. Однако в настоящее время отсутствуют анализ основных факторов, определяющих использование той или иной технологической схемы укатки, и оценка эффективности каждого из них. Необходимо с этих позиций дать обоснование использования различных методов укатки.

Описание и постановка задачи

При выполнении земляных работ наиболее часто используются сочленённые уплотняющие агрегаты, скомпонованные из гусеничных или колёсных тягачей и прицепных катков, представленных широким спектром уплотняющих машин. Причём наиболее эффективными являются вибрационные катки, имеющие дизельный, электрический или гидравлический приводы катка.

В дорожном строительстве достаточно распространённой является эллиптическая (кольцевая) схема непрерывного уплотнения грунтов (рис. 1), когда при возведении земляного полотна автомобильных и железных дорог движение уплотняющего агрегата производится от обочин к оси.

Производительность уплотняющего агрегата $\Pi_{ya}^э$ определяется объёмом грунта уплотняемого слоя Q , скоростью движения агрегата по эллиптической траектории, длиной участков разворота и степенью приближенности траекторий собственно уплотнения к прямой:

$$\Pi_{ya}^э = \frac{Q}{T_{ya}^э} \tag{I}$$

где: $T_{ya}^э$ – время работы уплотняющего агрегата на карте уплотнения.

Характерно, что общее время работы агрегата на карте уплотнения является суммой затрат времени на собственно уплотнение и развороты.

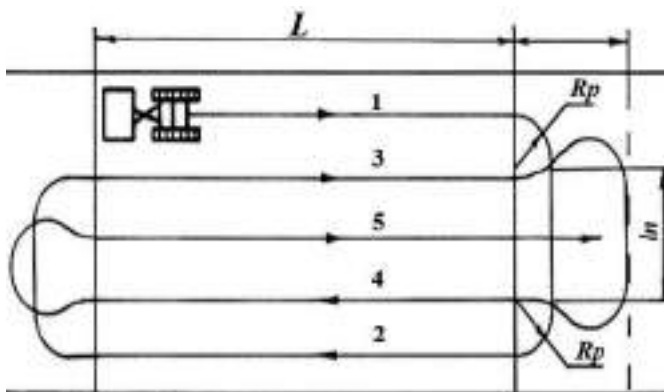


Рис. 1. Эллиптическая схема уплотнения грунтов

Исходя из расчётной схемы (рис. 1), имеем:

$$T_{ya}^э = nm \frac{L}{V_y} + \left(\frac{\pi R_p}{V_p} + \frac{L_n}{V_y} \right) nm, \tag{2}$$

где n – заданное число проходов агрегата по одному следу; m – количество полос уплотнения; V_p, V_y – скорости движения агрегата на прямолинейных участках и при разворотах.

Количество рабочих полос уплотнения определяется из выражения

$$m = \frac{B}{B_k - \Delta b}, \tag{3}$$

где $\Delta b = 0,1 \dots 0,5$ м – ширина перекрытия полос уплотнения; B – ширина зоны уплотнения; B_k – ширина рабочей поверхности уплотняющего агрегата.

Как правило, заданное число проходов уплотняющего агрегата по одному следу определяется по результатам опытного уплотнения. Тем не менее при уплотнении грунта на рабочих картах требуемая плотность может быть достигнута при меньшем числе проходов, в то время как в других случаях не достигается и при завершении предварительно принятого числа рабочих проходов по одному следу.

Линейная скорость агрегата на прямолинейных участках, то есть при собственно уплотнении, ограничена по верхнему пределу, а скорость разворота определяется типом механизма

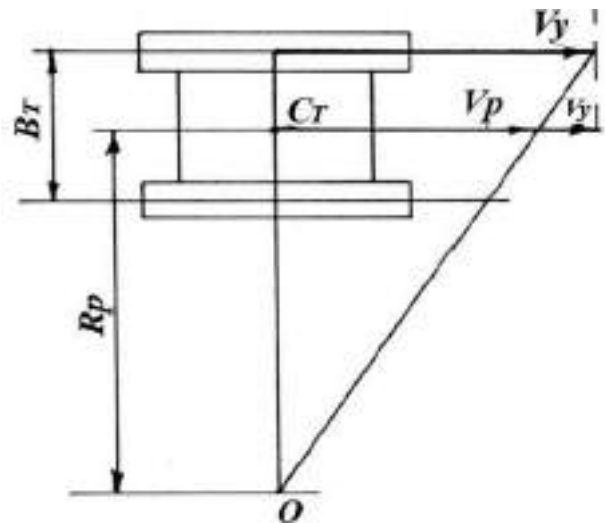


Рис. 2. Определение линейной скорости агрегата при развороте

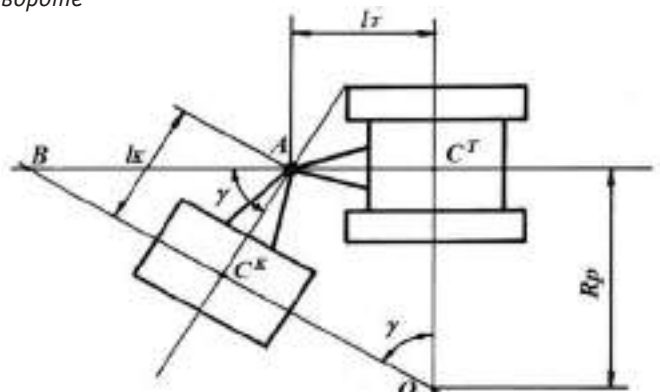


Рис. 3. Определение радиуса поворота агрегата при его развороте

поворота тягача уплотняющего агрегата и его конструктивными параметрами (рис. 2, 3).

Как следует из анализа расчётных схем (см. рис. 2, 3), линейная скорость уплотняющего агрегата V_p и радиус кривизны траектории R_p при развороте являются функциями его конструктивных параметров (рис. 3):

$$V_p = V_r \frac{R_r}{R_r + \frac{B_r}{2}}; \tag{4}$$

$$R_p = \frac{L_k + L_r \cos \varphi}{\sin \varphi}, \tag{5}$$

где φ – эксплуатационный угол складывания агрегата.

Метод решения

Опыт эксплуатации уплотняющих агрегатов, работающих по эллиптической схеме, а также численное решение выражения (2) показывают, что потери времени на развороты в среднем составляют 20% от общего времени работы агрегата на карте уплотнения. Поскольку в зонах разворота движение агрегата происходит по непостоянным траекториям и не по всей площади, указанные зоны считаются участками негарантированного уплотнения и подлежат повторному уплотнению при переходе уплотняющих агрегатов на смежную рабочую карту.

Анализ схемы (см. рис. 1) показывает, что минимальная ширина карты уплотнения, на которой может быть реализована классическая эллиптическая схема уплотнения, определяется как:

$$B_{\min} = 4R_p + B_k - \Delta \sigma. \tag{6}$$

Что же касается эллиптической схемы, использующей кольцевой метод разворота агрегата, при котором:

$$B_{\min}^k = B_k + 2R_p, \tag{7}$$

то в этом случае длина зоны разворота существенно возрастает:

$$L_{\min}^k = \sqrt{(2R_p)^2 - (B_k - \Delta \sigma)^2} + R_p + \frac{B_k}{2}, \tag{8}$$

тогда как при классической эллиптической схеме

$$L_{\min}^f = R_p + \frac{B_k}{2}. \tag{9}$$

Очевидно, что представленные параметры, в свою очередь, существенно ограничивают область применения эллиптической схемы уплотнения, поскольку в реальных условиях габаритные размеры карт уплотнения и зон разворота могут быть ниже значений, определённых выражениями (6) и (8).

Значительный опыт возведения насыпных строительных объектов показал, что уплотняющий агрегат, работающий в режимах статического и вибрационного уплотнения, обеспечивает качественное уплотнение грунтов практически всего спектра, используемого при строительстве насыпных и инженерных сооружений.

Возможность использования агрегата в статическом режиме позволяет производить предварительное уплотнение мелкофракционных малосвязных грунтов без расширения парка уплотняющих машин.

Традиционной для прицепных катков и основанных на их базе сочленённых уплотняющих агрегатов является эллипти-

ческая схема уплотнения, при которой предъявляются жёсткие требования по минимальным размерам карт уплотнения и манёвренности уплотняющих агрегатов.

Исследования, выполненные в этом направлении, позволили сформулировать выражение для максимального угла «складывания» модулей уплотняющего агрегата, определяющего его минимальный радиус поворота

$$\varphi = \arctg \left[\frac{(l_k - l_r)^2}{B_r^2} + 90^\circ - \frac{\gamma}{2} \right], \tag{10}$$

где l_r – расстояние от центра тяжести тягача до шарнира сцепного устройства; l_k – расстояние от центра тяжести тягача до края гусениц; B_r – базовый габарит тягача; γ – угол раствора дышла катка.

Однако полученное выражение, являясь функцией геометрических размеров, не учитывает силовых возможностей тягача агрегата.

Мощный трактор-тягач осуществляет поворот по дуге большого радиуса в несколько приёмов путём последовательного торможения и растормаживания гусеницы, ближайшей к центру поворота. При этом уплотняющий агрегат претерпевает последовательные «складывание» и «выпрямление».

Расчёт потребных сил тяги гусениц тягача для осуществления складывания агрегата на угол складывания γ при обобщении данных о значениях физико-механических свойств грунтов позволил определить влияние значений угла складывания агрегата при вариации значений коэффициентов сцепления $\varphi_{\text{сц}}$ сопротивления прямолинейному движению и повороту на значение потребной силы тяги забегающей гусеницы (рис. 4, 5).

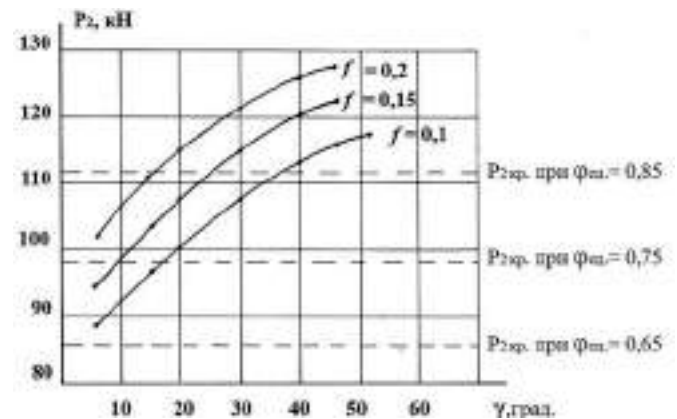


Рис. 4. Влияние угла складывания и коэффициента на потребную силу тяги забегающей гусеницы при $\mu_{\max} = 0,5$

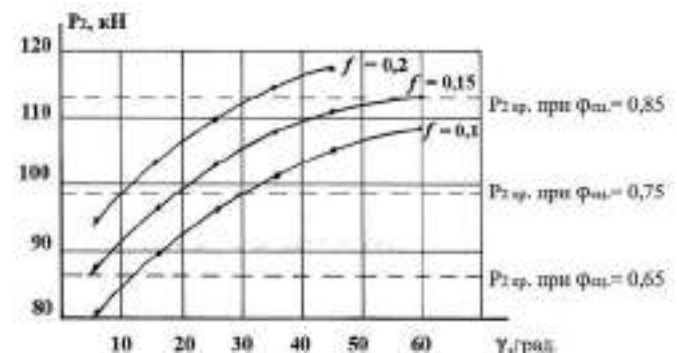


Рис. 5. Влияние угла складывания γ и коэффициента на потребную силу тяги забегающей гусеницы при $\mu_{\max} = 0,4$

Было установлено, что при средних значениях коэффициента сцепления $\varphi_{\text{ФЦ}} = 0,75$, коэффициента сопротивления прямолинейному движению $f = 0,15$ и коэффициента сопротивления повороту $\mu_{\text{max}} = 0,45$, максимальный угол складывания модулей уплотняющего агрегата не превышает $\gamma = 13,5^\circ$, при котором с учётом выражения (5) радиус поворота агрегата не может быть менее $R = 58,7$ м, что предопределяет минимальную ширину карты уплотнения при эллиптической схеме уплотнения равной $B = 117$ м.

С учётом того, что при строительстве насыпных инженерных сооружений за редким исключением ширина карт уплотнения существенно меньше, можно сделать вывод о необходимости перевода уплотняющего агрегата на челночную схему уплотнения грунтов.

Наиболее эффективной и наименее критичной к топографическим и геометрическим параметрам рабочих площадок является челночная схема уплотнения, при которой уплотняющие машины совершают возвратно-поступательные движения, сопровождаемые боковым смещением на смежную рабочую полосу после достижения требуемой плотности на предыдущей полосе.

При реализации классической схемы уплотнения (рис. 6) потери времени на смену рабочей полосы минимальны и при общем времени работы уплотняющего агрегата на карте уплотнения составляют не более 2% от общего времени работы агрегата на карте:

$$T_{\text{ys}}^2 = mn \frac{L}{V_y} + \left(\frac{2\alpha R_{\text{п}}}{V_p} + \frac{2ln}{V_y} \right) (m - 1), \quad (10)$$

где α – длина дуги траектории поворота, определяемая конструктивными параметрами уплотняющего агрегата.

Причём в ряде случаев при значениях $n > 6$ смена рабочей полосы допускается без выхода уплотняющего агрегата за пределы карты уплотнения.

Результаты и выводы

Таким образом, из существующих технологических схем непрерывного послыонного уплотнения насыпных грунтов наиболее производительной является челночная схема уплотнения. Наиболее перспективными ввиду своей универсальности и эффективности при уплотнении различных видов грунтов являются уплотняющие агрегаты, скомпонованные из гусеничных тягачей и прицепных виброкатков. С учётом того, что при строительстве насыпных инженерных сооружений за редким исключением

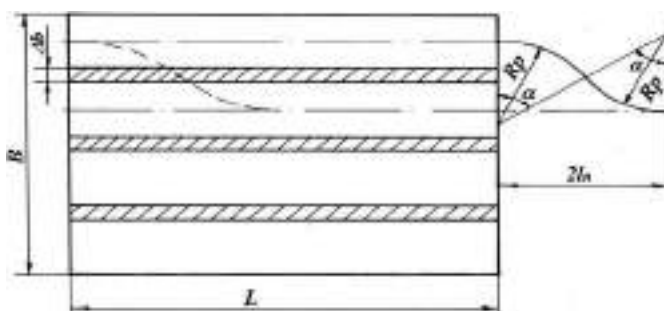


Рис. 6. Челночная схема уплотнения грунтов

ширина карт уплотнения существенно меньше, можно сделать вывод о необходимости перевода использования уплотняющего агрегата в челночную схему уплотнения грунтов.

Кроме того, наиболее эффективной и наименее критичной к топографическим и геометрическим параметрам рабочих площадок является также челночная схема уплотнения, при которой уплотняющие машины совершают возвратно-поступательные движения, сопровождаемые боковым смещением на смежную рабочую полосу после достижения требуемой плотности на предыдущей полосе.

Литература

1. Алексеева, Т.Е. Дорожные машины. Часть 1. Машины для земляных работ / Т.Е. Алексеева, К.А. Артемьев, В.Г. Белокрылов. – М.: Машиностроение, 1972. – 504 с.
2. Баловнев, В.И. Оптимизация параметров и режимов систем для уплотнения дорожно-строительных материалов / В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов, Г.В. Курстарев // Наука и техника в дорожной отрасли: Международный научно-технический журнал. – М., 2012. – №1. – С. 35-38.
3. Брянский, Ю.А. Тягачи строительных и дорожных машин / Ю.А. Брянский, М.И. Грифф, В.А. Чурилов. – М.: Высшая школа, 1976. – 356 с.
4. Вибрации в технике: справочник. Том 4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
5. Гончаров, С.А. Лекции по теоретической механике: учебное пособие. Т.3. Аналитическая механика / МАДИ; 2-е изд., исправ. и доп. – М., 2010. – 371 с.: ил.
6. Дудолаев, Ю.А. Активное сцепное устройство тракторного тандема строительных и дорожных машин / Ю.А. Дудолаев, А.И. Гальперин // Строительные и дорожные машины. – 1977. – №8. – С. 18.
7. Карасёв, Г.Н. Исследование и повышение эффективности машин для земляных работ: учебное пособие / Г.Н. Карасев; ротап rint МАДИ. – М., 2011.
8. Малиновский, Е.Ю. Динамика самоходных машин с шарнирной рамой / Е.Ю. Малиновский, Н.М. Гайцгори. – М.: Машиностроение, 1974. – 175 с.
9. Малиновский, Е.Ю. Устойчивость движения колесной машины с шарнирно-сочлененной рамой / Е.Ю. Малиновский // Строительные и дорожные машины. – 1971. – № 10. – С. 21.
10. Ульянов, Н.А. Самоходные колесные землеройно-транспортные машины / Н.А. Ульянов. – М.: Машиностроение, 1976. – 359 с.
11. Фаробин, Я.Е. Теория поворота транспортных машин / Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.

Literatura

1. Alekseeva T.E. Dorozhnye mashiny. Chast' 1. Mashiny dlya zemlyanyh rabot / T.E. Alekseeva, K.A. Artem'ev, V.G. Belokrylov. – М.: Mashinostroenie, 1972. – 504 s.
2. Balovnev V.I. Optimizatsiya parametrov i rezhimov sistem dlya uplotneniya dorozhno-stroitel'nyh materialov /

V.I. Balovnev, R.G. Danilov, G.V. Kurstarev // Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli: Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal. – M., 2012. – №1. – S. 35-38.

3. *Bryanskij Yu.A.* Tyagachi stroitel'nyh i dorozhnyh mashin / Yu.A. Bryanskij, M.I. Griff, V.A. Churilov. – M.: Vysshaya shkola, 1976. – 356 s.

4. *Vibratsii v tehnike: spravochnik. Tom 4. Vibratsionnye protsessy i mashiny* / Pod red. E.E. Lavendela. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 509 s.

5. *Goncharov S.A.* Lektsii po teoreticheskoy mehanike: uchebnoe posobie. T.3. Analiticheskaya mehanika / MADI; 2-e izd., isprav. i dop. – M., 2010. – 371 s.: il.

6. *Dudolaev Yu.A.* Aktivnoe stepnoe ustrojstvo traktornogo tandema stroitel'nyh i dorozhnyh mashin / Yu.A. Dudolaev, A.I. Gal'perin // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. – 1977. – № 8. – S. 18.

7. *Karasev G.N.* Issledovanie i povyshenie effektivnosti mashin dlya zemlyanyh rabot: uchebnoe posobie / G.N. Karasev; rotaprint MADI. – M., 2011.

8. *Malinovskij E.Yu.* Dinamika samohodnyh mashin s sharnirnoj ramoj / E.Yu. Malinovskij, N.M. Gajtsgori. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 175 s.

9. *Malinovskij E.Yu.* Ustojchivost' dvizheniya kolesnoj mashiny s sharnirno-sochlenennoj ramoj / E.Yu. Malinovskij // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. – 1971. – № 10. – S. 21.

10. *Ul'yanov N.A.* Samohodnye kolesnye zemlerojno-transportnye mashiny / N.A. Ul'yanov. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 359 s.

11. *Farobin Ya.E.* Teoriya povorota transportnyh mashin / Ya.E. Farobin. – M.: Mashinostroenie, 1970. – 176 s.

Суэтина Татьяна Александровна (Москва). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН. Заведующая кафедрой гидравлики ФГБОУ ВПО Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64). Сфера научных интересов: гидравлика водопропускных, очистных и дорожных сооружений, автоматизация технологических процессов в строительстве. Автор 125 публикаций. Тел.: 8 (499) 155-08-00. E-mail: ranas@rambler.ru.

Марсова Екатерина Вадимовна (Москва). Доктор технических наук. Профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВПО Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64). Сфера научных интересов: автоматизация технологических процессов в строительстве. Тел.: 8 (499) 155-08-00. E-mail: ranas@rambler.ru.

Кустарев Геннадий Владимирович (Москва). Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедры дорожных и строительных машин ФГБОУ ВПО Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64). Сфера научных интересов: автоматизация технологических процессов в строительстве. Автор свыше 79 публикаций.

Борисов Юрий Владимирович (Москва). Старший преподаватель кафедры теоретической механики ФГБОУ ВПО Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64). Сфера научных интересов: автоматизация технологических процессов в строительстве. Автор 13 публикаций. E-mail: RANAS@RAMBLER.RU

Suetina Tatyana Aleksandrovna (Moscow). Doctor of technical sciences, professor, corresponding member of RAACS. Head of the Hydraulics Department at the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI, 125319, Moscow, Leningradskij ave., 64). Sphere of scientific interests: hydraulics of culverts, treatment plants and road constructions, automation of technological processes in construction. The author of 125 publications. Tel.: +7 (499) 155-08-002. E-mail: ranas@rambler.ru. Moscow, Leningradsky Prospect, 64.

Marsova Ekaterina Vadimovna (Moscow). Doctor of technical sciences. Professor of the Department of Automation of production processes at the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI, 125319, Moscow, Leningradskij ave., 64). Sphere of scientific interests: automation of technological processes in construction. Tel.: +7 (499) 155-08-00. E-mail: ranas@rambler.ru.

Kustarev Gennady Vladimirovich, candidate of technical sciences, professor, head of the Department of Road and Construction Machines at the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI, 125319, Moscow, Leningradskij ave., 64). Sphere of scientific interests: automation of technological processes in construction. The author of more than 79 publications. E-mail: ranas@rambler.ru.

Borisov Yuri Vladimirovich, senior lecturer of the Department of Theoretical Mechanics at the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI, 125319, Moscow, Leningradskij ave., 64). Sphere of scientific interests: automation of technological processes in construction. Author of 13 publications. E-mail: ranas@rambler.ru.