

2. Sherstnev N.S., Ignatov S.D. Raschet moshhnosti silovoj ustanovki dorozhnoj frezy / N.S. Sherstnev [Calculation of power installation's capacity of road harrow]. *Razvitie dorozhno-transportnogo i stroitel'nogo kompleksov i osvoenie strategicheskij vazhnyh territorij. S 34 Sibiri i Arktiki: vklad nauki: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*, Omsk: SibADI, 2014. Kn. 2. 79-81 p.

3. Available at: <http://slugba111.ru/stati/chtotakoe-dorozhnaya-freza.html> (accessed at: 24.05.2015)

4. *Stroitel'nye mashiny i oborudovanie: Spravochnoe posobie dlja proizvodstvennikov-mehaničizatorov, inženerno-tehnicheskijh rabotnikov stroitel'nyh organizacij, a takzhe studentov stroitel'nyh vuzov, fakul'tetov i tehnikumov* [Construction machinery: Handbook for manufacturers and machine operators, engineers and technical workers of construction companies, as well for students of construction's universities, faculties and colleges]. Beleckij B. F., Bulgakova I. G. Izd. vtoroe, pererabot, i dopoln. Rostov n/D: Feniks, 2005. 608 p. (Stroitel'stvo)

5. Shherbakov V.S. Nauchnye osnovy povyshenija tochnosti rabot, vypolnjaemyh zemlerojno-transportnymi mashinami. Dis. dokt. tehn. nauk [Scientific basics for improving the accuracy of works, performed by earthmovers]. Omsk: SibADI, 2000. 416 p

6. Shherbakov V.S. *Sostavlenie strukturnykh shem zemlerojno-transportnyh mashin kak obektov avtomatizacii: Uchebnoe posobie*. [Drawing up the block diagrams of earth-moving and transport machines as objects of automation]. Omsk: Izd-vo SibADI, 2001. 47 p.

7. *Modelirovanie zemlerojno-transportnyh mashin v srede Matlab-Simulink: metodicheskie ukazaniya k vpolneniju laboratornyh rabot* / sost.: V.S.

Shherbakov, A-j A. Ruppel', I. V. Lazuta, S. A.. Miljushenko [Modeling of earth-moving machines in the Matlab-Simulink: instructions for implementing laboratory works]. Omsk: SibADI, 2010. 42 p.

8. *Spravochnik konstruktora dorozhnyh mashin* [Reference book for road machines' mechanic]. Pod redakciej kand. tehn. nauk I.P. Borodacheva izdatel'stvo «MASHINOSTROENIE» Moscow, 1965.- 725 p.

Игнатов Сергей Дмитриевич (Россия, Омск) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: SDAvvadon@mail.ru).

Шерстнев Никита Сергеевич (Россия, Омск) – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: kashei_55rus@mail.ru).

Ignatov Sergey Dmitrievich (Russian Federation, Omsk) – candidate of technical science, associate professor of the department "Automation of production processes and electrical engineering" of The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, 5 Mira st., e-mail: address - ISDAvvadon@mail.ru).

Sherstnev Nikita Sergeevich (Russian Federation, Omsk) – postgraduate student of the department "Automation of production processes and electrical engineering" of The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, 5 Mira st., e-mail address - kashei_55rus@mail.ru).

УДК 624.137.4(088.8)

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ЗЕМЛЕРОЙНОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ В ГЛИНИСТОМ РАСТВОРЕ

А.С. Кадыров, Ж.Ж. Жунусбекова, А.А. Ганюков

Карагандинский государственный технический университета, Казахстан, г. Караганда.

Аннотация. *Рассматриваются вопросы напряженно-деформированного и прочностного расчета цилиндрических фрез землеройных машин, работающих под давлением глинистого раствора. Получены зависимости напряжений возникающих во фрезе с учетом инерционных нагрузок и давления глинистого раствора. Создана методика прочностного расчета на стадии изготовления фрез.*

Ключевые слова: *фреза, расчет, методика, землеройная машина, раствор.*

Введение

В последнее время в Казахстане резко увеличались объемы строительного производства. При этом нулевой цикл работ часто приходится производить в стесненных условиях городской или промышленной

застройки, высоком уровне грунтовых вод, без остановки действующего производства, с обеспечением необходимой устойчивости грунтовых массивов от обрушения. В наибольшей степени этим условиям отвечает способ строительства подземных сооружений

«стена в грунте». Сущность его заключается в проходке узких и глубоких траншей под слоем глинистого тиксотропного раствора с последующим заполнением их бетоном, глиноцементными смесями или сборными железобетонными элементами [1]. Глинистый раствор служит для удержания стенок траншеи от обрушения. Этим способом можно строить: технологические подвалы, тоннели метро, подземные гаражи и склады, приемные бункера, подпорные стенки, насосные станции и др. Ведущая операция технологического процесса строительства способом «стена в грунте» является разработка траншеи в грунте. Траншея разрабатывается удлиненными обратными лопатами экскаваторов, грейферами, фрезерными и бурильными машинами. Так как рабочие органы вышеназванных машин работают в среде большой плотности, то их конструкции, помимо нагрузки от сил резания, испытывают дополнительные нагрузки от глинистого раствора. Однако, до настоящего времени при проектировании машин практически не уделялось внимание прочностному расчету рабочих органов землеройных машин, работающих в глинистом растворе. В связи с этим встает необходимость установления зависимости определяющей конструктивные и прочностные параметры рабочего органа землеройных машин в зависимости от сил сопротивления фрезерованию грунта и нагружения глинистого раствора.

Материал и методы исследований

Покажем величину и характер нагружения фрезерного рабочего органа землеройной машины при разработке грунта под давлением глинистого раствора. Фрезерный рабочий орган представляет собой стальной толстостенный цилиндр с резаками на боковой поверхности. Цилиндрическая фреза вращается с постоянной угловой скоростью ω и движется со скоростью подачи V (рисунки 1). Для землеройных машин $\omega \ll V$. Нагружение рабочего органа происходит $2,5 \text{ т/м}^3$ от сопротивления движению к сопротивлению грунта резанию в тиксотропном растворе. Авторами впервые были проведены целый ряд теоретических и экспериментальных исследований по установлению сил сопротивления движению рабочих органов фрезерных машин в среде глинистого раствора [2]. Для цилиндрических тел были установлены следующие зависимости момента сил сопротивления при шведовском режиме течения:

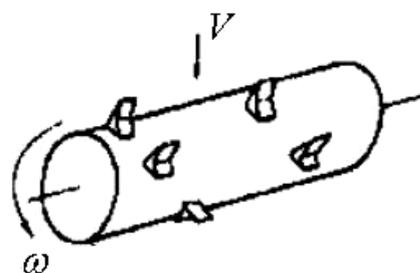


Рис. 1. Цилиндрическая фреза

$$M_C = R_C R, \quad (1)$$

где,

$$R_C = F \frac{\eta_1 \varepsilon E_1 E_2 + \sigma_0 t E_1 E_2}{\left[E_1 (1 - e^{-t/t_0}) + E_2 \right] \eta_1 + t E_1 E_2},$$

M_C – момент сил сопротивления; F – площадь боковой поверхности цилиндра; η_1 – релаксационная вязкость; ε – относительная деформация; E_1 – начальный условно-мгновенный модуль сдвига; E_2 – модуль эластичности; σ_0 – предел упругости, ниже которого остаточные деформации не развиваются; t – время; t_0 – время релаксации.

При бингамовском режиме течения раствора:

$$M_C = \pi R^2 L \tau_0 \left[3 - \frac{r_T^2}{R} - \ln \frac{r_T^2}{R} \right], \quad (2)$$

где L – длина цилиндра; τ_0 – предельное напряжение сдвига; r_T – радиус зоны вязкопластичного движения, который является функцией реологических характеристик раствора и угловой скорости цилиндра.

При псевдоламинарном режиме:

$$M_C = 2\pi R^2 L \mu \omega, \quad (3)$$

где η – структурная вязкость. Указанные выше режимы течения возникают при различных скоростях движения раствора, вследствие перемещения в нем рабочего органа землеройной машины.

Помимо указанных сил со стороны раствора на фрезу действует гидродинамическая сила сопротивления среды, определяющаяся по закону Бернулли:

$$P = P_{амм} + H \rho g + \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4)$$

где $P_{атм}$ – атмосферное давление на поверхности; H – высота столба погружения; ρ – плотность раствора; v – линейная скорость внешнего диаметра фрезы; g – ускорение свободного падения.

В процессе фрезерования грунта на фрезу передаются усилия вызванные силами сопротивления резанию грунта (рис. 2).

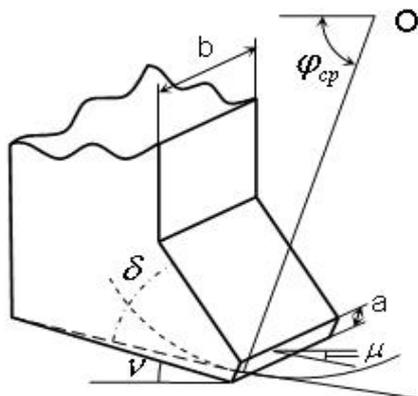


Рис. 2. Схема резца
b - ширина резца; a – ширина площадки износа резца

Для определения сил резания была предложена усредненная модель резца [1], на основе которой получены усилия подачи Q и крутящий M для фрезерования грунта:

$$Q = Ah, \quad M = BhR, \quad (5)$$

$$A = 0,5i\phi b m_{св} (1 + \eta' a) + im_{бок.ср},$$

$$B = 0,5i\phi b m_{св} \left((1 + \eta' a) \cos \phi_{ср} + \left\{ ctg(\delta + \mu) + \eta' actg(\delta_1 + \mu) \sin \phi_{ср} \right\} \right) + im_{бок.ср} \left(\cos \phi_{ср} + ctg(\delta + \mu) \sin \phi_{ср} \right), \quad (6)$$

где A и B – удельные силы сопротивления подаче и вращению фрезы, зависящие от физико-механических свойств грунта, конструкции инструмента и определяющие усилие подачи и крутящий момент, необходимые для разрушения слоя грунта толщиной h (рис. 3); i – количество резцов на фрезе; $m_{св}$ – удельное сопротивление грунта срезу по Ветрову [3].

Таким образом, фрезерный рабочий орган землеройной машины испытывает нагружения от глинистого раствора, силы выталкивания и сил сопротивления резанию. В процессе эксплуатации машин обнаруживались деформации и разрушения фрезы, что приводило к заполнению внутренней поверхности фрезы глинистым раствором и выводу из строя дорогостоящего двигателя, который располагается внутри цилиндра и приводит его во вращение. В

связи с этим на этапе изготовления конструкции фрезерного рабочего органа встала необходимость проведения его прочностных расчетов.

Математической модель прочностного расчета фрезерного рабочего органа сводится к определению всех компонент тензора напряжений по толщине стенки в поперечном сечении толстостенного цилиндра возникающих вследствие воздействия указанных выше нагрузок, а также учета центробежных сил инерции, возникающих из-за вращения фрезы. При расчетах были приняты некоторые допущения.

В частности была принята нагруженная модель толстостенного цилиндра, находящегося под действием равномерно распределенных по всей длине цилиндра нормальных P_b^n и касательных P_b^c нагрузок.

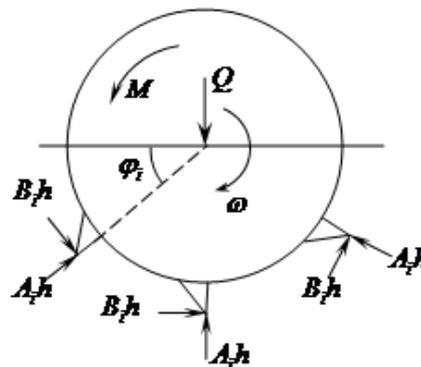


Рис. 3. Схема сил, действующая на модель фрезы

Напряжения по толщине стенки будут зависеть только от радиуса. При таких условиях цилиндр находится в условиях плоской деформации, что позволяет это сделать из-за отсутствия сплошного дна жестко связанного с боковыми стенками цилиндрической фрезы. Расчетная схема фрезы представлена на рисунке 4.

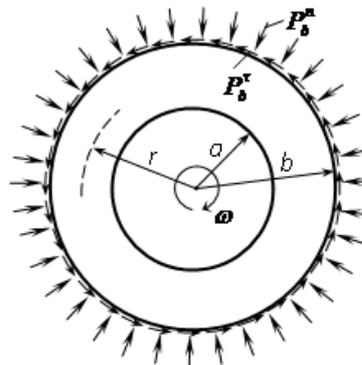


Рис. 4. Расчетная модель фрезы

Аналитические выражения для определения напряженного состояния плоского сечения цилиндра в условиях плоского напряженного состояния с учетом

инерционных нагрузок и нагружений, показанных на рисунке 4, в полярной системе координат определяется следующими выражениями [4]:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -P_b^n \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left[1 - \frac{a^2}{r^2} \right] + \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 \left[b^2 + a^2 - \frac{a^2 b^2}{r^2} - r^2 \right], \\ \sigma_\theta &= -P_b^n \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left[1 + \frac{a^2}{r^2} \right] + \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 \left[b^2 + a^2 + \frac{a^2 b^2}{r^2} - \frac{1 + 3\nu}{3 + \nu} r^2 \right], \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{P_b^r}{\left(b^{\sqrt{2}-1} - \frac{a^{2\sqrt{2}}}{b^{\sqrt{2}+1}} \right)} \left[\frac{a^{2\sqrt{2}}}{r^{\sqrt{2}+1}} - r^{\sqrt{2}-1} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где ρ – плотность материала; ω – угловая скорость фрезы; r – радиус; ν – коэффициент Пуассона.

Величина нормальной нагрузки P_b^n включает в себя давление оказываемое тиксотропным раствором, определяемое по формуле (4), удельные силы сопротивления фрезерованию Ah , определяемые по формулам (6). Поскольку фреза вращается постоянной угловой скоростью, то инерционные нагрузки так же распределены радиально. Величина касательной нагрузки P_b^r содержит нагрузку от момента сил сопротивления глинистого раствора при различных режимах течения определяемых по формулам (1), (2) и (3), удельную силу сопротивления фрезерованию Bh , определяемую по формулам (6). Все указанные нагрузки являются приведенными к боковой площади цилиндра. Величины главных напряжений определяются следующим образом:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + 4\sigma_{r\theta}^2}, \quad (8)$$

Как показали исследования, напряжения нагруженной фрезы при малых угловых скоростях являются отрицательными (сжимающими) и наибольшие по своей абсолютной величине являются окружные напряжения σ_θ , которые достигают максимального значения на внутреннем диаметре фрезы при $r=a$ (рис. 5). В расчетах принято $b=2a$.

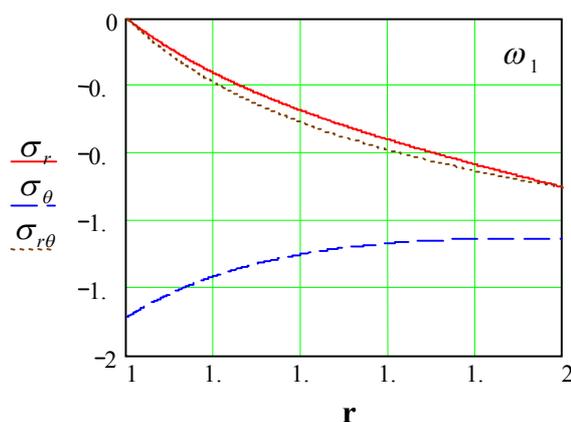


Рис. 5. Напряжения по толщине стенки фрезы при небольших значениях ω

При значительном увеличении угловой скорости, при которой происходит фрезерование грунта, сжимающие напряжения σ_r и σ_θ переходят в положительные значения, то есть становятся растягивающими и стремятся вместе с инерционными нагрузками разорвать вращающуюся фрезу (рис. 6). Это является причиной образования трещин на внутреннем диаметре фрезы, где материал переходит в пластичное состояние, и приводит во время эксплуатации к ее постепенному разрушению. Однако, проведенные исследования показали, что при определенных оптимальных значениях угловой скорости и величин суммарных нагрузок на фрезу все напряжения возникающие по толщине стенки лежат в одном диапазоне и являются небольшими (допустимыми) по величине (рис. 7).

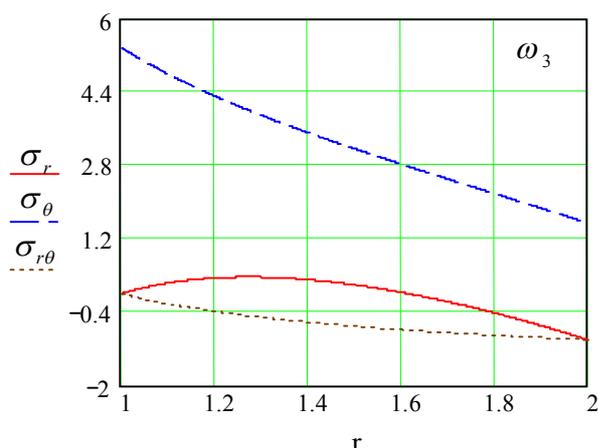


Рис. 6. Напряжения по толщине стенки фрезы при больших значениях ω

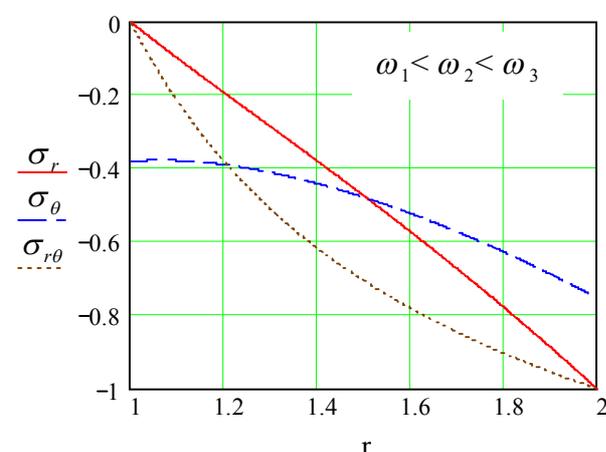


Рис. 7. Напряжения по толщине стенки фрезы при оптимальных значениях ω

Это позволяет подобрать оптимальный режим работы фрезерного рабочего органа и конструктивные особенности таким образом, что бы сделать фрезерный рабочий орган более экономичным и прочным, снизив тем самым энергозатраты двигателей землеройной машины [5,6].

Выводы

Инженерная методика расчета цилиндрических фрез на прочность была реализована в виде пакета прикладных программ, результатами работы которого является выдаваемая толщина стенки и оптимальный режим работы землеройной машины. В программе проверка прочности производится по известным теориям прочности в упругой области работы материала на основе главных напряжений (8) [7,8]. Полученные результаты используют при проектировании машин УТФ-2, РФ-600.

Библиографический список

1. Хамзин, С.К. Основы строительного производства / С.К. Хамзин. – Астана: Фолиант, 2006. – 317 с.
2. Кадыров, А.С. Фрезерные и бурильные машины. Теория и расчет / А.С. Кадыров, Р.Р. Хайбуллин, Б.К. Курмашева. – Караганда: Изд-во ТОО «Санат-Полиграфия», 2007. – 214 с.
3. Ветро, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветро. – М.: Машиностроение, 1971, 359 с.
4. Pai-Chi Chang, Fu-Shou Wang, Jia-Huei Hwang, Wei-Fang Chen. Research on the design and manufacturing of an outer cycloid slotting cutter /The International Journal of Advanced Manufacturing Technology/2005, Volume 27, Issue 3-4, pp 248-253.
5. Dragoslav Janosevic, Rosen Mitrev, Boban Andjelkovic, Plamen Petrov. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency //Journal of Zhejiang University SCIENCE A/2012, Volume 13, Issue 12, pp 926-942
6. Кадыров, А.С. Теоретические основы проектирования и расчета бурильных и фрезерных землеройных машин / А.С. Кадыров, З.А. Мулдагалиев, А.С. Нурмаганбетов, Б.К. Курмашева, Ж.Ж. Жунусбекова. – Издательство Болашак-Баспа, Караганда, 2010. – 220 с.
7. Бестембек Е.С. Нагружение фрезерного рабочего органа для проходки траншей в грунтах: дис... канд. техн. наук: Караганда, КарГТУ, дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.05.04: защищена 10.05.07: утв. 21.12.07 /Е.С. Бестембек; науч. рук. проф. А.С. Кадыров; КарГТУ. – Караганда, 2007. – 123 с.
8. Хайбуллин, Р.Р. Разработка и расчет двухфрезерного рабочего органа для строительства фундаментов типа «стена в грунте» / Р.Р. Хайбуллин. – Караганда: Санат, 2006. – 115 с.

CALCULATION ON DURABILITY OF THE MILLING WORKER OF BODY OF THE DIGGING CAR WORKING IN CLAY SOLUTION

A.S. Kadyrov, Zh.Zh. Zhunusbekova, A.A. Ganyukov

Abstract. The issues concerning stress-strained and calculation durability of cylindrical saw soil digging machine are regarded, which work under the pressure of clay mortar. The correlations of strains occurring in a saw are got, taken into consideration with the inert loadings and clay mortar pressure. Here, the methods of calculation durability at the stage of saw manufacturing are worked out.

Keywords: mill, calculation, methodology, earthmoving machine, solution.

References

1. Hamzin S.K. *Osnovy stroitel'nogo proizvodstva* [Bases of construction production]. Astana: Foliant, 2006, 317 p.
2. Kadyrov A.S., Hajbullin R.R., Kurmasheva B.K. *Frezernye i buril'nye mashiny. Teorija i raschet* [Ampere-second. Milling and boring cars. Theory and calculation]. Karaganda: Izd-vo TOO «Sanat-Poligrafija», 2007. 214 p.
3. Vetro Ju.A. *Rezanie gruntov zemlerojnymi mashinami* []. Moscow, Mashinostroenie, 1971, 359 p.
4. Pai-Chi Chang, Fu-Shou Wang, Jia-Huei Hwang, Wei-Fang Chen. Research on the design and manufacturing of an outer cycloid slotting cutter /The International Journal of Advanced Manufacturing Technology/2005, Volume 27, Issue 3-4, pp 248-253.
5. Dragoslav Janosevic, Rosen Mitrev, Boban Andjelkovic, Plamen Petrov. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. Journal of Zhejiang University SCIENCE A/2012, Volume 13, Issue 12, pp 926-942
6. Kadyrov A.S. Muldagaliev Z.A., Nurmaganbetov A.S., Kurmasheva B.K., Zhunusbekova Zh.Zh. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rascheta buril'nyh i frezernyh zemlerojnyh mashin* [Ampere-second. Theoretical bases of design and calculation of boring and milling digging cars]. Izdatel'stvo Bolashak-Baspa, Karaganda, 2010. 220 p.
7. Bestembek E.S. *Nagruzhenie frezernogo rabocheho organa dlja prohodki transhej v gruntah: dis. kand. tehn. nauk* [Loading of the milling worker of body for a driving of trenches in soil: dis. cand. tech. sciences]. KarGTU. – Karaganda, 2007. 123 p.
8. Hajbullin R.R. *Razrabotka i raschet dvuhfrezernogo rabocheho organa dlja stroitel'stva fundamentov tipa «stena v grunte»* [Development and calculation of the two-milling worker of body for construction of the bases like "wall in soil"]. Karaganda: Sanat, 2006. 115 p.

Кадыров Адиль Сураатович (Казахстан, Караганда) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортная техника и организация движения (СДМ), КарГТУ (100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56).

Жунусбекова Жанара Жумашкызы (Казахстан, Караганда) – старший преподаватель кафедры «Транспортная техника и организация движения (СДМ), КарГТУ (100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, e-mail: zhzhzh_84@mail.ru).

Ганюков Александр Анатольевич (Казахстан, Караганда) – старший преподаватель кафедры «Дизайн, архитектура и прикладная механика», КарГТУ (100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, e-mail: a.ganjukov@kstu.kz).

Kadyrov Adil Suratovich (Republic Of Kazakhstan, Karaganda) – doctor of technical science, professor of the department «Transport Technology and Traffic Organization», Karaganda State Technical University (KSTU) (100027, The Republic Of Kazakhstan, Karaganda city, Mira Boulevard, No. 56, e-mail: adil.suratovich@gmail.com).

Zhunusbekova Zhanara Zhumashkyzy (Republic Of Kazakhstan, Karaganda) – senior teacher of the department «Transport Technology and Traffic Organization», Karaganda State Technical University (KSTU) (100027, The Republic Of Kazakhstan, Karaganda city, Mira Boulevard, No. 56, e-mail: zhzhzh_84@mail.ru).

Ganiukov Alexander Anatolievich (Republic Of Kazakhstan, Karaganda) – senior teacher of the department «Design, architecture and applied mechanics», Karaganda State Technical University (KSTU) (100027, The Republic Of Kazakhstan, Karaganda city, Mira Boulevard, No. 56, e-mail: a.ganjukov@kstu.kz).

УДК 681.51:621.878

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПОГРУЖЕНИЕМ ВИНТОВОЙ СВАИ**

И.В. Лазута, Е.Ф. Лазута
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В данной статье приводятся структура и математическое описание системы автоматического управления погружением винтовой сваи. Структура системы представлена в виде схемы с параметрическими связями между блоками. Авторами предложена математическая модель системы, состоящая из моделей отдельных подсистем, для которых приведены расчетные схемы и дифференциальные уравнения. Значительное внимание в представленной математической модели уделяется зависимостям между множеством конструктивных параметров системы.