

УДК 625.089.4

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫ ПРИ РАЗРУШЕНИИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

С.Д. Игнатов, Н.С. Шерстнев  
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются уравнения геометрических связей звеньев дорожной фрезы, математическая модель силы реакции разрабатываемой среды на фрезерный барабан, изменение положения зуба при вращении барабана и перемещении машины, определение угла контакта фрезы, изменение толщины стружки от подачи на  $i$ -тый зуб, связь толщины стружки и подачи на  $i$ -тый зуб, расчетная схема сил, действующих на зуб фрезерного барабана.

**Ключевые слова:** дорожная фреза, рабочий орган, сила реакции, резание асфальтобетона.

### Введение

Автомобильная дорога рассчитана на определенный срок службы, в течении которого она подвергается различного рода воздействиям транспорта и погодно-климатических факторов. Самым первым и наиболее не защищенным ее элементом, испытывающим такие воздействия, является асфальтобетонное покрытие. Практикой установлено, что поверхность покрытия, нуждающаяся в локальном текущем ремонте, ежегодно может составлять до 2-3 % от общей площади покрытия дороги или ее участка. Когда серьезные повреждения и дефекты достигают 12-15 %, общепринято ставить на ремонт 100 % этой площади. Особый вид техники, применяемый при проведении разнообразных ремонтных работ дорожного покрытия и проведении дорожно-строительных работ, называется дорожной фрезой [1,2,3].

### Математическая модель рабочего процесса дорожной фрезы при разрушении асфальтобетона

Дорожная фреза для холодного фрезерования - самоходная машина на колесном или гусеничном шасси, в нижней части которой размещается фрезерный барабан [4]. При проектировании дорожной фрезы одним из этапов является исследование статических и динамических характеристик на основе адекватной математической модели. Основой математической модели является расчетная схема.

Для составления расчетной схемы математической модели машины были приняты следующие допущения [5,6]: рассматриваются изменения вертикальных координат звеньев расчетной схемы; машина представлена в виде многозвенника, отражающего раму машины с двигателем,

трансмиссией, передний ведомый мост, задний ведущий мост, а также фрезерный барабан; рабочий орган (РО) зафиксирован относительно рамы гидроцилиндрами; звенья многозвенника абсолютно жесткие; колеса от опорной поверхности не отрываются и имеют с ней точечный контакт.

С учетом принятых допущений была составлена упрощенная пространственная расчетная схема дорожной фрезы, которая представлена на рисунке 1.

Рама машины, включающая в себя остов, двигатель, редуктор, установку гидросистемы, ходовое оборудование задается системой координат  $O_1X_1Z_1Y_1$ . Центр тяжести машины находится в точке  $O_1$ . Фрезерный барабан, включающий в себя барабан с поддерживающей рамой и опорными гидроцилиндрами, задается системой координат  $O_2X_2Z_2Y_2$ . Центр тяжести РО находится в точке  $O_2$ . Передний ведомый мост, включающий в себя элементы ходового оборудования, задается системой координат  $O_3X_3Z_3Y_3$ . Центр тяжести переднего моста находится в точке  $O_3$ .

Для выполнения расчетов в инерциальной системе координат  $O_0X_0Z_0Y_0$  задается плоскость отсчета, проходящая через оси  $O_0X_0$  и  $O_0Y_0$ .

Расстояния до ходового оборудования и РО от этой плоскости обозначены:  $Z_{\Gamma 1}$  – вертикальная координата левого ведомого переднего колеса;  $Z_{\Gamma 2}$  – вертикальная координата левого ведущего заднего колеса;

- $Z_{\Gamma 1}$  – вертикальная координата правого ведомого переднего колеса;  $Z_{\Gamma 2}$  – вертикальная координата правого ведущего заднего колеса;

На рисунке 1 даны следующие обозначения:  $L_5$  – расстояние от оси переднего ведомого моста до оси заднего

ведущего моста;  $L$  – расстояние от оси переднего ведомого моста до оси вращения РО;  $L_{\text{ш}}$  – ширина базы дорожной фрезы;  $L_{\text{РО}}$  – ширина фрезерного барабана;  $F_{\text{ХС}}$ ,  $F_{\text{ZC}}$  – сила

реакции разрабатываемой среды на РО;  $F_{\text{ТК1}}$ ,  $F_{\text{ТК2}}$ ,  $F_{\text{ТК3}}$ ,  $F_{\text{ТК4}}$  – силы тяги ходового оборудования,  $V_{\text{П}}$  – поступательная скорость машины.

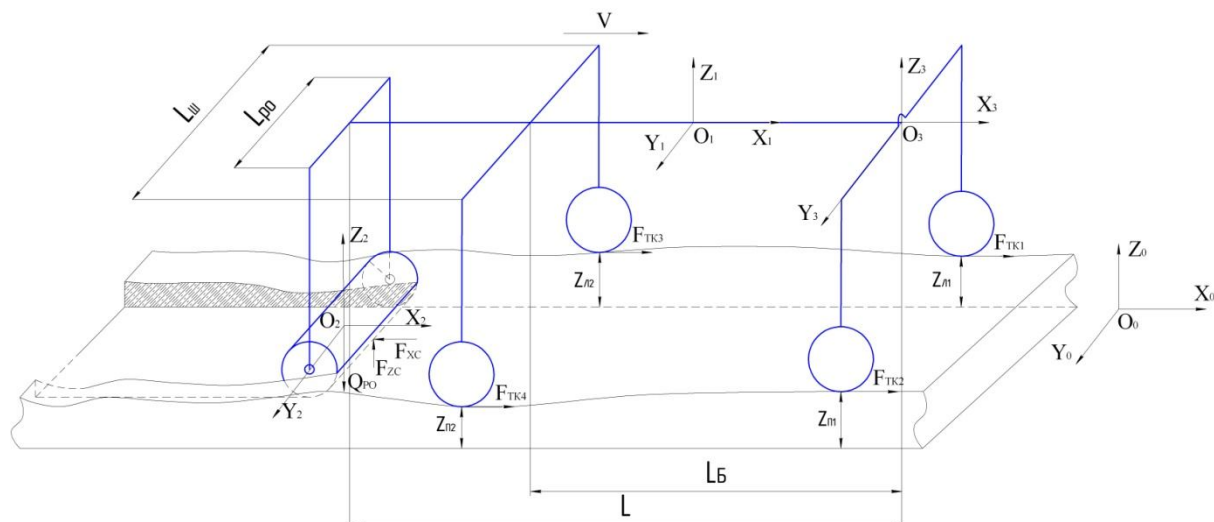


Рис. 1. Упрощенная пространственная расчетная схема дорожной фрезы

Для составления уравнения геометрических связей использовано понятие "коэффициента базы" [6]

$$K_{\text{Б}} = \frac{L}{L_{\text{Б}}} \quad (1)$$

Из рисунка 1 можно записать следующее выражения для расчета вертикальной координаты  $Z_{\text{ЦП}}$ , при наезде передним колесом на неровность:

$$Z_{\text{ЦП}} = 0,5 \cdot (Z_{\text{Л1}} + Z_{\text{П1}}) \quad (2)$$

По аналогии с зависимостью 2, уравнение при наезде задним колесом на неровность

$$Z_{\text{ЦЗ}} = 0,5 \cdot (Z_{\text{Л2}} + Z_{\text{П2}}), \quad (3)$$

где  $Z_{\text{ЦЗ}}$  - центр заднего моста, м.

Вертикальная координата РО представлена зависимостью [7]

$$Z_{\text{РО}} = (1 - K_{\text{Б}}) Z_{\text{ЦП}} + K_{\text{Б}} Z_{\text{ЦЗ}} \quad (4)$$

Так как рассматривается установившийся рабочий процесс, то для расчета вертикальной координаты РО необходимо учесть требуемое ее значение  $Z_{\text{РО\_ZAD}}$ .

При разрушении дорожного полотна фрезой на каждый зуб действует переменная

сила сопротивления разрушению. При этом в одинаковый момент времени каждый зуб срезает стружку разной толщины. При резании по ходу движения машины, в начале дуги контакта РО с дорожным полотном сила сопротивления, как и толщина срезаемой стружки - минимальна. В конце дуги контакта - максимальна, так как стружка имеет наибольшую толщину. При этом наблюдается скол части разрабатываемой среды от массива.

На толщину стружки влияют преимущественно два фактора: положение зуба на дуге контакта РО с дорожным полотном (определяется угловой координатой  $\alpha$ ) в определенный момент времени  $t$  и пройденный машиной путь за интервал времени от 0 до  $t$  (рис. 2).

На рисунке 2 представлено изменение положения зуба в разные моменты времени. В начальный момент времени (1) сила сопротивления разрушению и толщина срезаемой стружки будет минимальна, путь, пройденный машиной равен нулю. При дальнейшем продвижении машины в продольной плоскости будет увеличиваться толщина срезаемой стружки, причем, чем больше дуга контакта РО с дорожным полотном, тем больше будет ее максимально возможное значение.

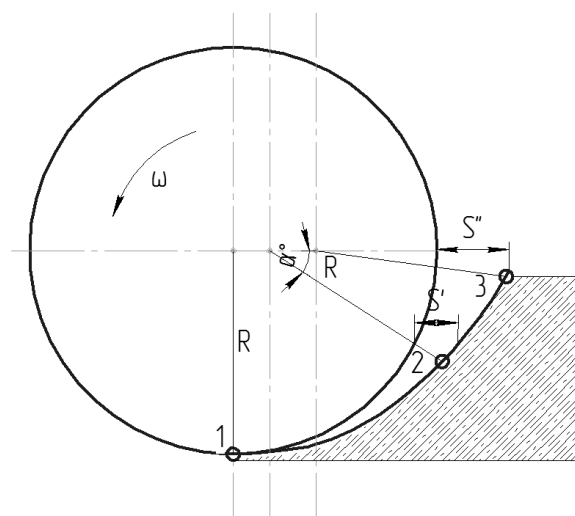


Рис.2. Изменение положения зуба при вращении барабана и перемещении машины

За определенный интервал времени зуб РО изменит свое положение с позиции 1 на 2 (рис. 2). За этот же интервал времени фреза пройдет в продольной плоскости путь  $S$ . При изменении положения зуба с позиции 1 на 3 - фреза пройдет путь  $S''$ .

Так как расположение зубьев на барабане может быть разным, необходимо поверхность барабана разделить на  $m_\phi$  секторов с одинаковым расположением и количеством зубьев. Центральный угол между двумя соседними зубьями фрезы определяется зависимостью

$$\alpha^\circ = 360^\circ / z, \quad (5)$$

где  $z$  - количество зубьев на одном секторе, шт.

Рассчитать число зубьев в продольном сечении барабана, находящихся в контакте с дорожным полотном, можно при помощи зависимости

$$m = \varphi^\circ / \alpha^\circ, \quad (6)$$

где  $\varphi$  - угол контакта фрезы — центральный угол, соответствующий дуге соприкосновения окружности фрезы с обрабатываемой средой, измеряемый в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, град.

Для этого необходимо рассмотреть процесс заглабления РО фрезы (рис. 3).

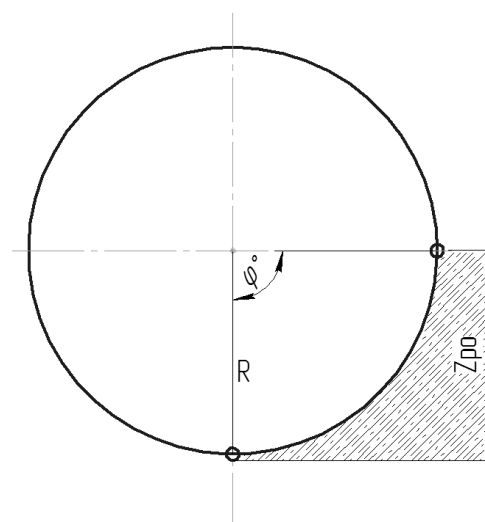


Рис. 3. Определение угла контакта фрезы с обрабатываемой средой

Для определения угла контакта фрезы воспользуемся общеизвестным уравнением

$$\varphi^\circ = \arccos\left(1 - \frac{Z_{\text{РО}}}{R}\right), \quad (7)$$

где  $R$  - радиус фрезерного барабана, м.

Для каждого зуба, находящегося в контакте с обрабатываемой средой можно определить время, за которое он достигнет координаты впереди идущего зуба.

$$t_i = \frac{\alpha_i}{2\pi n_\phi}, \quad (8)$$

где  $\alpha_i$  - угловая координата  $i$ -го зуба, рад;  
 $n_\phi$  - частота вращения фрезерного барабана, об/с.

За это же время машина, а также и рассматриваемый зуб, пройдут путь в продольной плоскости (рис. 4)

$$S_i = V_\Pi \cdot t_i, \quad (9)$$

где  $V_\Pi$  - поступательная скорость машины, м/с.

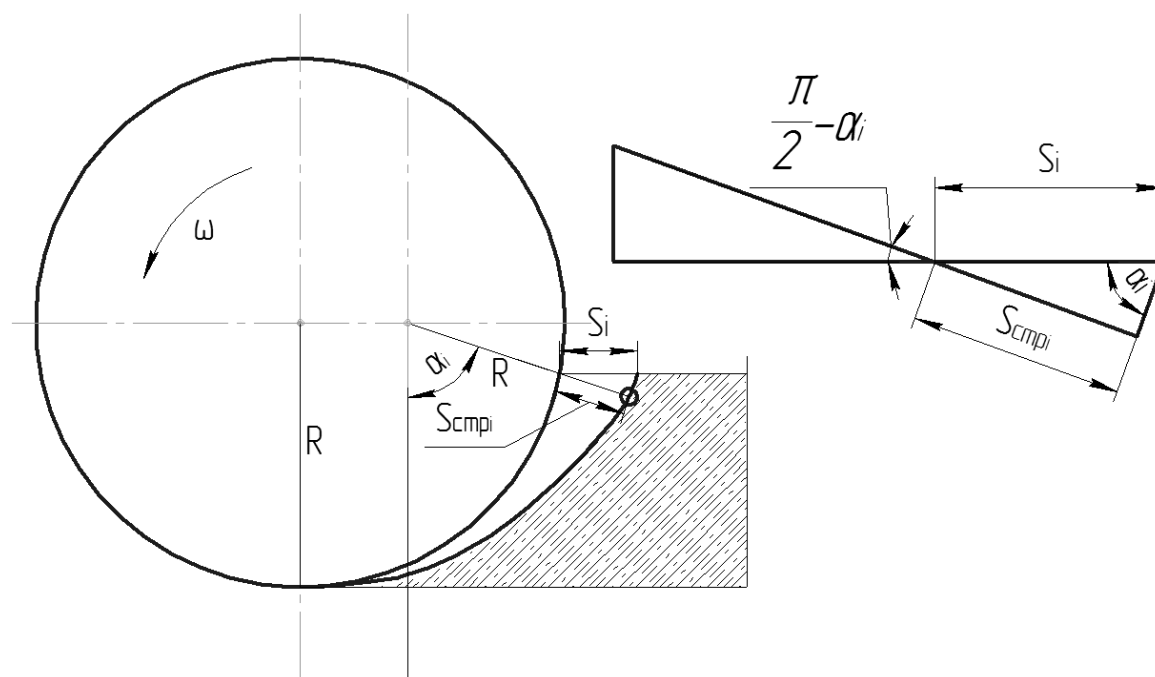


Рис. 4. Изменение толщины стружки от подачи на  $i$ -тый зуб

Решая (8) и (9) совместно, получаем зависимость, которая позволяет рассчитать путь, прошедший зубом в продольной плоскости:

$$S_i = V_{\Pi} \cdot \frac{\alpha_i}{2\pi n}. \quad (10)$$

Связь подачи на  $i$ -тый зуб и толщины срезаемой им стружки отражается зависимостью

$$S_{стрi} = S_i \cdot \sin \alpha_i, \quad (11)$$

где  $S_{стрi}$  - толщина стружки, срезаемой  $i$ -тым зубом, м.

Так как частота вращения фрезерного барабана, а следовательно и его окружная скорость, и поступательная скорость перемещения машины прямо пропорциональны, то величина стружки будет зависеть как от угловой координаты, которую в данный момент времени принимает  $i$ -тый зуб, так и от коэффициента пропорциональности распределения угловой скорости вала двигателя внутреннего сгорания между потребителями.

При расчете  $S_{стрi}$  необходимо учесть, что угловая координата последнего зуба,

находящегося на дуге контакта (рис. 2, позиция 3), принимается равной  $\alpha_i = \varphi^\circ$ , так как зуб в этой точке формирует стружку наибольшей толщины. Это приводит к тому, что в конечной точке  $S_{стрi} \rightarrow S$ , или  $S_{стрi} = S$

при условии, что  $Z_{PO} = R$ .

Одним из важнейших показателей эффективности рабочего процесса дорожной фрезы является энергоёмкость процесса разрушения разрабатываемой среды.

Тангенциальная составляющая силы резания (рис. 5) определяется зависимостью [8]

$$F_{ti} = \frac{N_i}{V_{рез}} = \frac{q \cdot d_{зуба} \cdot S_{стрi} \cdot Z_{PO} \cdot n_{\phi}}{V_{рез}}, \quad (12)$$

где  $N_i$  - мощность кругового резания разрабатываемой среды одним зубом, Вт;  $F_{ti}$  - тангенциальная составляющая силы резания разрабатываемой среды  $i$ -тым зубом, Н;  $V_{рез}$  - скорость резания фрезерного барабана, м/с;  $q$  - удельное сопротивление резанию, Н/м<sup>2</sup>;  $d_{зуба}$  - диаметр основания зуба, м.

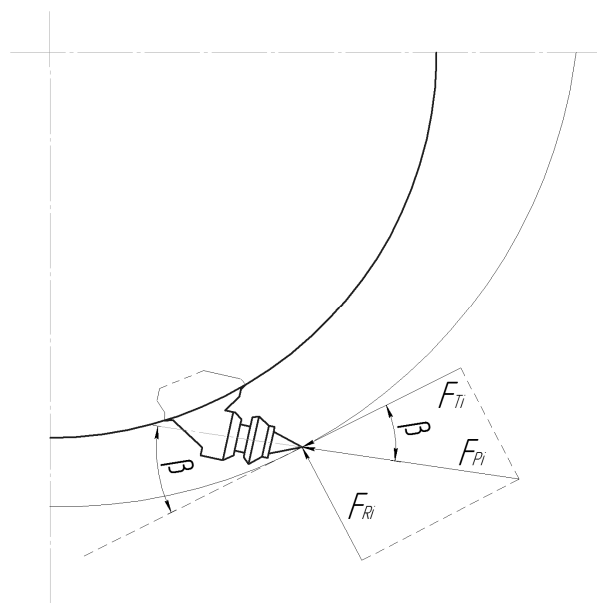


Рис. 5. Расчетная схема сил, действующих на зуб

В соответствии с зависимостями (10), (11) и (12) получаем уравнение силы сопротивления резанию разрабатываемой среды  $i$ -тым зубом

$$F_{Pi} = \frac{q \cdot d_{\text{зуба}} \cdot Z_{PO} \cdot V_{II} \cdot \frac{\alpha_i}{2\pi} \cdot \sin \alpha_i}{V_{\text{рез}}} \cdot \cos \beta, \quad (13)$$

где  $\beta$  - угол атаки зуба, рад.

Полная сила сопротивления резанию имеет вид

$$F_p = m_{\phi} \cdot \sum_1^m \left( \frac{q \cdot d_{\text{зуба}} \cdot Z_{PO} \cdot V_{II} \cdot \frac{\alpha_i}{2\pi} \cdot \sin \alpha_i}{V_{\text{рез}}} \cdot \cos \beta \right) \quad (14)$$

### Заключение

Представленные уравнения геометрических связей позволяют провести исследование взаимодействия звеньев дорожной фрезы между собой и рассчитать текущее значение вертикальной координаты фрезерного барабана. Полученная математическая модель реакции разрабатываемой среды на фрезерный барабан позволяет рассчитать силу сопротивления разрушению этой среды, учитывая при этом параметры фрезерного барабана и рабочего процесса дорожной фрезы.

### Библиографический список

1. Краснолудский, А.В. Определение рациональных параметров эксцентричной дорожной фрезы: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, СГТУ, 2004. – 177 с.

2. Шерстнев, Н.С. Расчет мощности силовой установки дорожной фрезы/ С.Д. Игнатов Н.С. Шерстнев // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий. С 34 Сибири и Арктики: вклад науки: материалы Международной научно-практической конференции. – Омск: СибАДИ, 2014. –Кн. 2. – 79-81с.

3. Электронный ресурс. Режим доступа – <http://slugba111.ru/stati/chto-takoe-dorozhnaya-freza.html> (дата обращения 24.05.2015)

4. Строительные машины и оборудование: Справочное пособие для производителей-механизаторов, инженерно-технических работников строительных организаций, а также студентов строительных вузов, факультетов и техникумов / Белецкий Б. Ф., Булгакова И. Г. Изд. второе, переработ, и дополн. — Ростов н/Д: Феникс, 2005. — 608 с. — (Строительство)

5. Щербаков, В.С. Научные основы повышения точности работ, выполняемых землеройно-транспортными машинами: дис. ... доктора техн. наук. – Омск: СибАДИ, 2000. – 416 с

6. Щербаков, В.С. Составление структурных схем землеройно-транспортных машин как объектов автоматизации: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2001. – 47 с.

7. Моделирование землеройно-транспортных машин в среде Matlab-Simulink: методические указания к выполнению лабораторных работ / сост.: В.С. Щербаков, А-й А. Руппель, И. В. Лазута, С. А.. Милушенко. – Омск: СибАДИ, 2010. – 42 с.

8. Справочник конструктора дорожных машин Под редакцией канд. техн. наук И. П.. Бородачева издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ» Москва 1965. – 725 с.

### MATHEMATICAL MODEL OF A ROAD HARROW'S OPERATING PROCESS IN DESTRUCTION OF ASPHALT CONCRETE

S.D. Ignatov, N.S. Sherstnev

**Abstract.** This article dwells on the equation of geometric constraints of road harrow's links, mathematical model of reaction force of developing medium on the rotor, changing the position of the cog during rotation and moving the machine, detection of angle contacting the harrow, the change of chip thickness from supply to the  $i$ -cog, connection of chip thickness and supply to the  $i$ -cog, design scheme of forces acting on the road harrow's cog.

**Keywords:** road harrow, operating device, reaction force, cutting asphalt concrete.

### References

1. Krasnoludskiy A.V. *Opredelenie racional'nyh parametrov jekscentrichnoj dorozhnoj frezy*. Diss. kand. tehn. nauk [Determination of rational parameters of eccentric road harrow]. Saratov, SGTU, 2004. 177 p.

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/chto-takoe-dorozhnaya-freza.html> (accessed at: 24.05.2015)

4. *Stroitel'nye mashiny i oborudovanie: Spravochnoe posobie dlja proizvodstvennikov-mehaniizatorov, inzhenerno-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. vtoree, pererabot, i dopoln. Rostov n/D: Feniks, 2005. 608 p. (Stroitel'stvo)

5. Shherbakov V.S. Nauchnye osnovy povysheniya 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 vypolneniju 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 увеличились 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