



УДК 624.139:879.004.69

© С. Н. Иванченко, С. А. Шемякин, А. Ю. Чебан, И. С. Ращенья, 2012

ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗУБА ЗЕМЛЕРОЙНОЙ МАШИНЫ С КРУПНООБЛОМОЧНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ В МЕРЗЛОЙ ПОРОДЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗАНИЮ

Иванченко С. Н. – д-р техн. наук, проф., ректор; *Шемякин С. А.* – д-р техн. наук, проф. кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле»; *Чебан А. Ю.* – канд. техн. наук, научный сотрудник Института горного дела ДВО РАН, доц. кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле», тел.: 37-52-02, e-mail: Chebanay@mail.ru; *Ращенья И. С.* – асп. кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле» (ТОГУ)

На основании экспериментальных исследований в лабораторных и полевых условиях предложены зависимости для определения сопротивления рыхлению зубьями выемочных машин мерзлых пород с крупнообломочными включениями.

On the basis of experimental studies in laboratory and field conditions dependencies for the determination of the resistance to tillage with extraction machine teeth of frozen rocks with coarse blocky debris inclusions are proposed.

Ключевые слова: порода, зуб, крупнообломочное включение, сопротивление рыхлению.

Мерзлые породы с крупнообломочными включениями широко распространены в природе и особенно на Северо-Востоке России. В связи с этим определение сопротивления рыхлению таких пород землеройной техникой представляет значительный интерес при строительстве и на открытых горных работах.

Мерзлые и вечномёрзлые породы с крупнообломочными включениями целесообразно рассматривать как совокупность двух систем: крупные минеральные включения (>2мм) и заполняющий поры между ними льдистый мелкозернистый заполнитель (глина, суглинок, супесь, песок, пыль, лед). Преобладающий размер окатанных крупнообломочных включений Северо-Востока России составляет 2-6 см [1], однако нередко встречается галька размером до 10 см и небольшие валуны размером до 50-100 см.

В процессе деформирования породы происходит взаимное сближение и

зацепление минеральных включений вследствие пластического отжатия льда из зоны концентрации напряжений. Основная часть внешней нагрузки воспринимается жесткими минеральными скелетными составляющими, передвижение которых вызывает постоянное перераспределение напряжений в заполнителе. Если в зону резания (рыхления), а именно перед режущей кромкой зуба, попадает крупный обломок, вмороженный в ненарушенную породу, то происходит его разламывание и дробление, когда прочность самого обломка меньше контактных сил смерзания с заполнителем. Мелкая галька и гравий, попавшие в зону уплотненного ядра или сдвига (отрыва) элемента стружки, поворачиваются относительно друг друга и относительно неподвижных обломков, граничащих с зоной разрыхления. Если в зону резания попадает крупный обломок, вмороженный основной частью в окружающую монолитную породу, то отделение элемента стружки происходит по поверхности обломка.

Сопrotивление разрыву мерзлых крупнообломочных пород обусловлено прочностью заполнителя, т. е. его влажностью и составом, а также силами смерзания на контакте заполнителя с поверхностью обломков. Обычно каждый обломок покрыт тонкой пленкой льда. Контактные силы смерзания существенно зависят от суммарной поверхности и шероховатости гравийно-галечной фракции. Во всех случаях по поверхности разрыва отделяемых элементов стружки при резании гравийно-галечные обломки выступают совершенно сухие и чистые. На монолите породы, остающейся вне элементов стружки, в местах соответствующим этим включениям имеют место гладкие вогнутые поверхности по форме обломка. Заполнитель же в порах между включениями, в зоне примыкающей к поверхности разрыва, разбит сетью мелких трещин. Это является свидетельством того, что наиболее ослабленными участками в мерзлых крупнообломочных породах при разрыве являются границы раздела между поверхностью крупных обломков и окружающей их пленкой льда.

Многочисленные эксперименты, проведенные в полевых и лабораторных условиях на передвижном стенде, свидетельствуют о том, что если крупнообломочное включение располагается внутри элемента стружки в зоне 2 (рис. 1), то оно не оказывает практически никакого влияния на сопротивление резанию. При расположении крупнообломочного включения на грани поверхности разрыва элемента стружки сопротивление резанию несколько снижается из-за меньшего сцепления породы с включением по сравнению со сцеплением породы-заполнителя. При понижении уровня расположения крупнообломочного включения в зону 1 (зона уплотненного ядра) сопротивление резанию заметно возрастает и тем быстрее, чем больше размеры включения. При расположении каменистого включения в зоне 1 происходит выдавливание его уплотненным ядром в зону 2.

Касательная составляющая сопротивления резанию достигает максимального значения тогда, когда статический момент площади контура включения, находящегося выше уровня режущей кромки зуба, равен статическому



моменту площади контура включения, находящемуся ниже уровня режущей кромки. При дальнейшем понижении уровня залегания включения отмечается резкое возрастание нормальной составляющей сопротивления резанию, связанное с вдавливанием обломка (гальки) в нижние слои породы, как штампа, с одновременным разворотом обломка в плоскости движения зуба. При движении крупнообломочного включения перед режущей кромкой зуба впереди включения в свою очередь формируется свое уплотненное ядро, размеры которого пропорциональны размеру включения. Если размер включения больше ширины режущей кромки зуба, то и уплотненное ядро перед камнем больше, чем перед зубом. Увеличение размеров уплотненного ядра перед включением вызывает увеличение размеров элементов отделяемых стружек и соответственно дополнительное возрастание сопротивлений резанию. Крупнообломочное включение вместе со своим уплотненным ядром играет роль дополнительного наконечника на зубе.

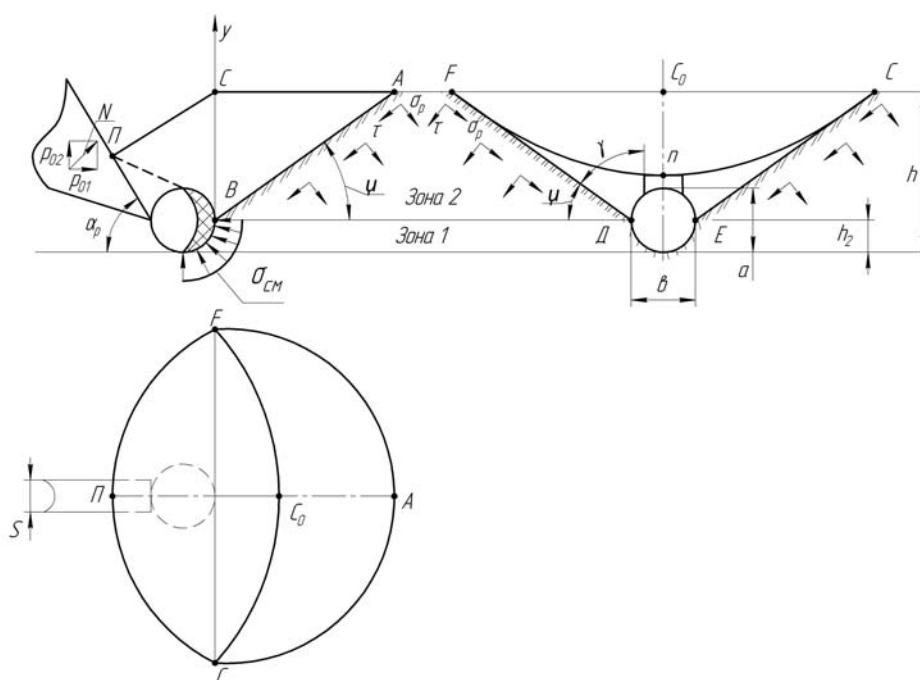


Рис. 1. Схема предельного равновесия элемента стружки для определения максимальной касательной составляющей сопротивления резанию блокированным способом мерзлой породы с крупнообломочным включением

Таким образом, при определении максимального значения касательной составляющей сопротивления резанию P_{01}^{\max} необходимо рассматривать схему предельного равновесия элемента стружки с включением, нейтральная

ось которого находится на уровне режущей кромки зуба. При определении максимального значения нормальной составляющей сопротивления резанию P_{02}^{\max} необходимо рассматривать схему предельного равновесия элемента стружки с включением, нейтральная ось которого располагается ниже уровня режущей кромки зуба (рис. 2).

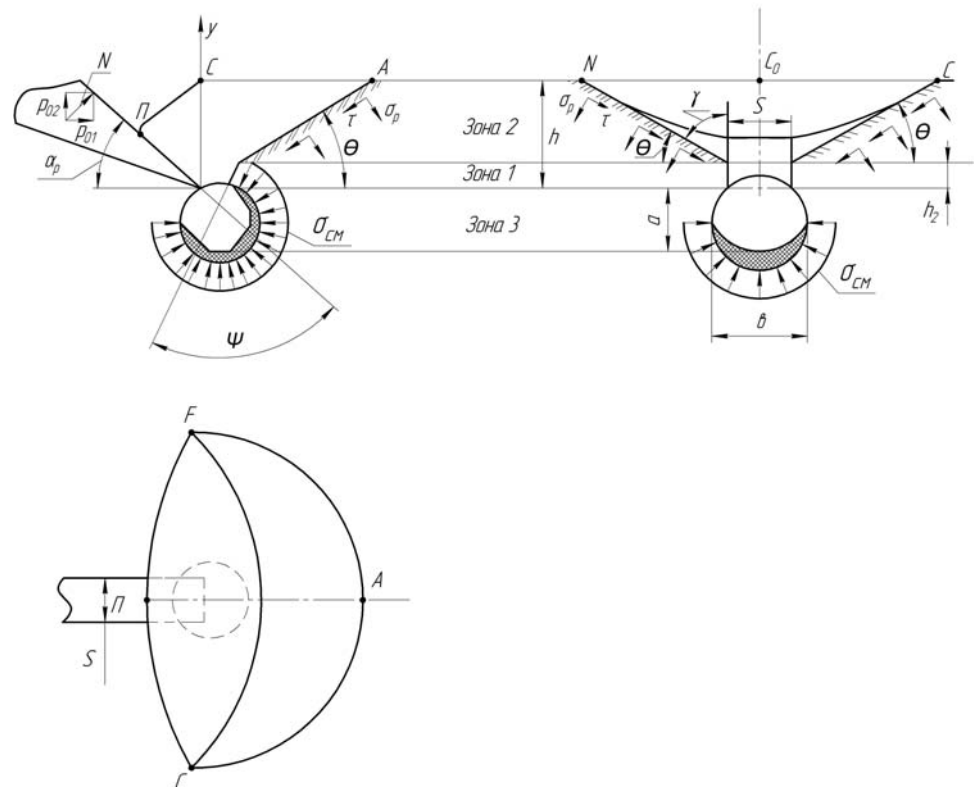


Рис. 2. Схема предельного равновесия элемента стружки для определения максимальной нормальной составляющей сопротивления резанию блокированным способом мерзлой породы с крупнообломочным включением

Рассматриваемые схемы для определения P_{01}^{\max} и P_{02}^{\max} справедливы для случая, когда прочность включения больше чем у заполнителя, а также при значениях отношений глубины резания к ширине режущей кромки зуба не более 5...6. При прочности включений меньше прочности заполнителя происходит их разрушение зубом, а касательная составляющая P_{01} сопротивления резанию и нормальная составляющая P_{02} не имеют максимальных значений. Известно [2], что при соотношении глубины резания к ширине зуба бо-



лее 5...6 энергоемкость резания породы начинает резко возрастать, поэтому создание рабочих органов с такими параметрами резания нецелесообразно.

При определении P_{01}^{\max} для случая заблокированного способа резания несвязной породы целесообразно рассматривать две зоны (рис. 1). Зона 1 – область смятия грунта перед уплотненным ядром. Если включение имеет округлые формы и $a \approx b$, то поверхность уплотненного ядра перед ним без большой погрешности можно принять шарообразной, а линия отрыва элемента стружки АВ идет из наиболее удаленной от зуба точки В. Развал породы в боковых прорезях идет из наиболее удаленных точек от оси зуба Д и Е. Высота зоны 1 равна h_2 , которую можно принять $a/2$. Напряжение смятия $\sigma_{см}$ приложено перпендикулярно к поверхности уплотненного ядра, которое представляет собой с лобовой стороны резания четверть шара (рис. 3).

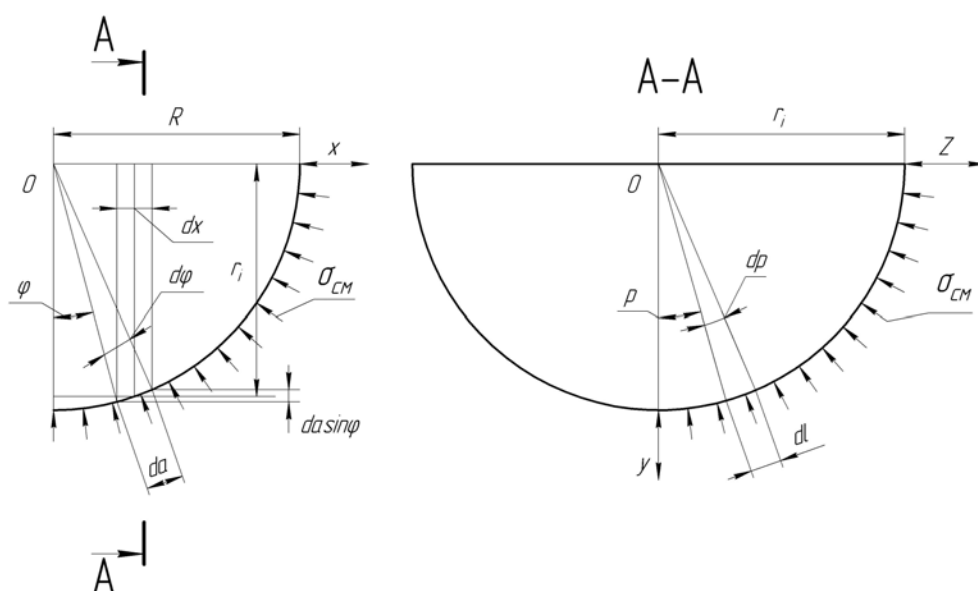


Рис. 3. Расчетная схема для определения касательной составляющей сопротивления резанию в зоне 2

Если выделить на поверхности одной восьмой шара полосу шириной dx , а на этой полосе элементарно-малую площадку $da \cdot dl$, то нормальное к поверхности этой площадки усилие будет равно $\sigma_{см} \cdot da \cdot dl$. Здесь $da = R \cdot d\varphi$, а $dl = r_i \cdot d\rho$.

Если перейти от da на $da \cdot \sin \varphi$, а перпендикулярное к поверхности



шара направление давления на элементарную площадку – на направление оси x , и учитывая, что $r_i = R \cdot \cos \varphi$, то усилие на элементарную площадку по направлению оси x будет равно

$$dN_x = \sigma_{cm} \cdot R^2 \cdot \sin^2 \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi \cdot d\rho,$$

а полное усилие

$$N_x = \sigma_{cm} R^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\rho \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi.$$

После интегрирования по $d\rho$

$$N_x = \sigma_{cm} R^2 \frac{\pi}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi,$$

и после интегрирования по $d\varphi$

$$N_x = \frac{\sigma_{cm} R^2 \pi}{2} \cdot \frac{\sin^3 \varphi}{3} \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{\sigma_{cm} \pi R^2}{6}.$$

Давление σ_{cm} на поверхность равную четверти шара соответственно в два раза больше, т. е.

$$N_x' = 2N_x = \frac{\sigma_{cm} \pi R^2}{3}.$$

Подобным образом можно определить давление в направлении той или иной оси на поверхность равную половине шара, т. е.

$$N_x'' = \frac{2\sigma_{cm} \pi R^2}{3}.$$

Если форма включения вытянута, т. е. $a \gg b$ или $b \gg a$, то и в этом случае определение давления на уплотненное ядро возможно путем суммирования давлений на цилиндрическую и шаровую поверхности. Даже в том случае, если лобовая поверхность включения имеет форму квадрата, определение давления на уплотненное ядро возможно, с незначительными допущениями, как на шаровую поверхность с радиусом окружности вписанной в контур квадрата. Таким образом, при заблокированном способе резания мерзлых пород касательная составляющая сопротивления резанию может быть определена по зависимости, в которой учтены сопротивления в зоне 2 с заменой S на b , а h_2 на $a/2$, исключением сопротивлений, связанных с затуплением режущей кромки зуба и перемещением уплотненного ядра перед зу-



бом, но с учетом сопротивлений на уплотненном ядре перед включением.

Тогда

$$P_{01}^{\max} = \frac{\sigma_{cm} \pi \left(\frac{b}{2}\right)^2}{3} + (\tau - \sigma_p \operatorname{tg} \theta) \left[\frac{h - \frac{a}{2}}{\operatorname{tg}^2 \theta} \left(b \cdot \operatorname{tg} \theta + h - \frac{a}{2} \right) \right].$$

В этой формуле второе слагаемое есть сопротивление резанию, определяемое путем интегрирования σ_p и τ по поверхности отделения элемента стружки в зоне 2 и изложенное ранее [5].

Определение максимального значения нормальной составляющей сопротивления резанию мерзлой породы (рис. 2) имеет ряд особенностей. Во-первых, максимальное значение P_{02}^{\max} возникает согласно экспериментальных данных [3, 4], в том случае, если большая часть контура включения располагается ниже уровня режущей кромки зуба и в этот момент происходит додавливание включения вглубь массива преимущественно площадью затупления зуба и в то же время продвижение включения по направлению движения зуба. Напряжения смятия возникают по поверхности уплотненного ядра перед лобовой поверхностью зуба (зона 1), а также на $\frac{3}{4}$ поверхности шара, соответствующей поверхности уплотненного ядра перед включением при условии, что $b \approx a$.

Поскольку часть напряжений смятия по поверхности уплотненного ядра действует вглубь массива породы и способствует затягиванию включения вниз, а часть σ_{cm} действует вверх и способствует выталкиванию рабочего органа вверх, то результирующим давлением будет то, которое действует на четверть шаровой поверхности, т. е.

$$N_x' = \frac{\sigma_{cm} \pi R^2}{3} = \frac{\sigma_{cm} \pi \left(\frac{b}{2}\right)^2}{3}.$$

Аналогично можно получить зависимость P_{02}^{\max}

$$P_{02}^{\max} = \sigma_{cm} \left[\frac{\pi \left(\frac{b}{2}\right)^2}{3} + sh_2 \operatorname{ctg}(\alpha_p + \psi) + \frac{\pi^2 \xi_1}{8} - \frac{\pi sh_2 \operatorname{tg} \varphi_2}{2} - \frac{\xi_1 h_2^2 \sin(2\alpha_p + \psi) \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \alpha_p \sin(\alpha_p + \psi)} \right] - (\operatorname{tg} \theta + \sigma_p) \left[\frac{h - h_2}{\operatorname{tg}^2 \theta} (stg \theta + h - h_2) \right].$$



Если известны максимальное тяговое усилие на рабочем органе машины и весовые характеристики машины, то с помощью выведенных зависимостей возможно решить обратную задачу по определению предельных размеров крупнообломочных включений в породе, при которых возможно ее резание.

Библиографические ссылки

1. *Тайбашев В.Н.* Физико-механические свойства мерзлых крупнообломочных пород. Труды ВНИИ-1. 1973. Т. XXXIII, С. 160.
2. *Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П.* Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. С. 424.
3. *Шемякин С.А.* Исследование процесса резания мерзлого грунта на экспериментальном стенде. Межвузовский сборник научных трудов. ХГТУ, 1972.
4. *Емельянов В.И., Мамаев Ю.А., Гриневич В.В. и др.* Механическое разрушение мерзлых пород землеройно-рыхлительными агрегатами / Магадан. : Магадан. кн. изд-во, 1978. С. 96.
5. *Шемякин С. А., Иванченко С. Н., Мамаев Ю. А.* Ведение открытых горных работ на основе совершенствования выемки пород. - М.: Издательство «Горная книга», 2006.- 350 с.:ил.