

С.А. Лавренко, И.С. Труфанова**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА
РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН
РЕЗАНИЕМ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СРЕДЕ ANSYS**

С использованием программной среды ANSYS рассмотрена задача разрушения массива кембрийских глин резанием, как динамическая контактная задача механики. Процесс резания представлен совокупностью процессов упруго-пластического деформирования и разрушения породы в локальной области под воздействием режущего инструмента. Полученные осциллограммы отражают реальные процессы картины резания горных пород, а найденные параметры режимов резания позволят работать при минимальных значениях удельных энергозатрат на разрушение глин, что позволит повысить производительность отбойки и приведет к повышению темпов проходческих работ при строительстве метро.

Ключевые слова: резец, разрушение, кембрийская глина, исполнительный орган.

Инженерно-геологические и гидрологические условия Санкт-Петербурга характеризуются большой неоднородностью и относительной сложностью, которую необходимо учитывать при освоении и использовании подземного пространства города, в том числе при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных транспортных сооружений.

Основная часть тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена пройдена в кембрийских глинах. Для выбора оптимальных параметров разрушения резанием исполнительными органами проходческих комплексов указанных пород предлагается выполнить моделирование процесса резания в среде ANSYS Workbench с последующей проверкой полученных зависимостей на экспериментальном стенде.

**Компьютерное моделирование
процесса резания кембрийских глин**

Массивы горных пород являются дискретными, анизотропными, неоднородными средами, обладающими начальным напряженным состоянием и к ним далеко не всегда применимы законы механики сплошных тел и механики

грунтов и, тем не менее, моделирование процессов разрушения массивов горных пород опирается именно на законы сплошной среды. Наиболее широкое распространение при решении задач механики сплошной среды получил метод конечных элементов.

На выбор модели механического состояния кембрийской глины влияет точность задания ее физико-механических свойств, отражающих ее напряженно-деформированное состояние в массиве, которое и определяет механическое воздействие на него при разрушении горных пород. Механические свойства пород в массиве разнятся в широких пределах. При компьютерном моделировании разрушения горных пород описываются только основные физические закономерности деформирования и разрушения породы.

Исследование процесса резания глин предлагается выполнить методом конечных элементов средствами пакета ANSYS Workbench, который позволит достаточно точно произвести расчет усилий на резце при разрушении кембрийских глин, основываясь на геометрической модели резца и физико-механических свойствах разрушаемой

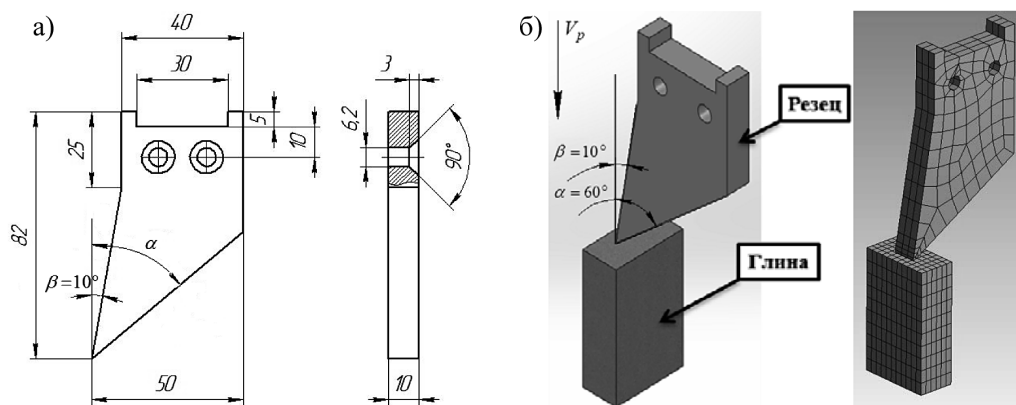


Рис. 1. Модель реза: а) конструкция реза; б) 3D модель реза стенда с образцом глины

породы. Моделирование процесса резания в среде ANSYS необходимо также для проверки изменения параметров резания для скоростей, которые невозможно проверить на физической модели процесса резания.

Моделирование процесса резания выполнялось по следующему алгоритму: формулирование допущений, построение геометрической виртуальной модели в среде Workbench (ANSYS), назначение исходных параметров модели и выполнение расчета.

На рис. 1, а показана конструкция реза, используемого при компьютерном моделировании, близкого по своим параметрам к резцу, принятому ИГД им. Скочинского в качестве эталонного. При моделировании угол заострения передней грани реза со-

ставлял 50° , задний угол $\beta = 10^\circ$, соответственно угол резания α был равен 60° . Величина заглубления реза h принималась в диапазоне 10–20 мм. Скорость резания была постоянна. Моделирование проводилось для граничных условий, имитирующих процесс резания массива кембрийских глин одиночным резцом. На рис. 1, б показана 3D модель реза стенда с образцом породы (использовалась объемная модель).

Материал реза – сталь 45 (45–50 HRC). Прочностные и деформационные характеристики стали 45 заложенные при решении поставленной задачи представлены в табл. 1.

Материал разрушаемой среды – кембрийская глина. Учитывая, что в различных источниках физико-меха-

Таблица 1

Прочностные и деформационные характеристики материала реза

Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
7800	$2 \cdot 10^{11}$	0,29	1630	1840

Таблица 2

Характеристики прочностных и деформационных свойств кембрийской глины

Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Предел текучести при растяжении, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа
2250	$4,4 \cdot 10^9$	0,35	1,8	15,38

нические свойства кембрийских глин разнятся в довольно широких пределах, то для нахождения свойств глин, соответствующих условиям ОАО «Метрострой» Санкт-Петербург были произведены испытания по их определению. Исследуемые образцы глины были отбиты при проходке в шахте метро «Бухарестская» на глубине около 60 м. Определение физико-механических свойств глин осуществлялось согласно [1]. В результате проведения серии экспериментов были получены физико-механические характеристики кембрийской глины. Средняя плотность образцов составила 2250 кг/м^3 . В табл. 2 представлены характеристики прочностных и деформационных свойств кембрийской глины. В дальнейшем именно эти характеристики были использованы при компьютерном моделировании.

Геометрические размеры образца кембрийской глины были взяты исходя из целесообразности времени проведения расчета. Длина образца глины была задана 5 см, что достаточно для описания процесса резания и получения необходимой информации о формировании элементарных сколов при резании породы.

Примем некоторые допущения для оценки напряженно-деформированного состояния глинистого массива, материал считается однородным сплошным и изотропным.

В процессе описания расчетной схемы были заданы некоторые огра-

ничения. Граничными условиями являлись ограничения по перемещениям, наложенные на исследуемую модель.

Параметры конечно-элементной модели, такие как: тип конечных элементов, размер конечных элементов, порядок конечных элементов для всех измерений были определены одинаково. Это было сделано для того, чтобы исключить влияние плотности сетки конечно-элементной модели. При такой постановке задачи различие в полученных результатах зависит только от величины заглубления резца в глину.

Так как максимальные напряжения возникают в области режущей кромки резца, то для увеличения скорости расчета конечно-элементная модель имеет следующие особенности: в зоне наконечника размеры элементов имеют минимальные значения, что дает более точные численные данные о напряжениях, возникающих в резце. Размер конечных элементов плавно увеличивается при удалении от режущей кромки.

В ходе решения задач для контроля выходных данных были выбраны 500 точек, равномерно распределенные по всему времени расчета, по которым, в дальнейшем, производилась оценка полученных данных.

В ANSYS были заданы основные параметры модели и ее расчета: выбран тип решаемой задачи (статический расчет), создана сетка конечных элементов.

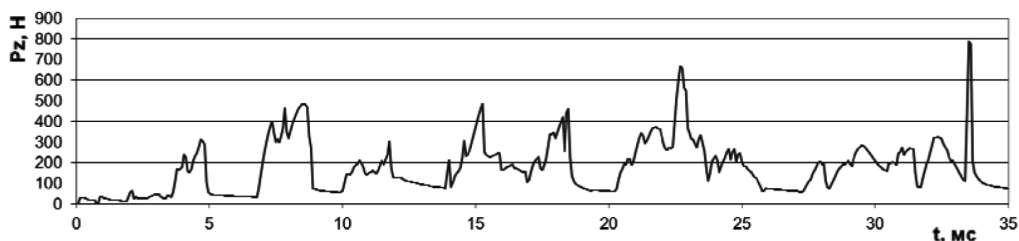


Рис. 2. Оциллограмма процесса разрушения образца кембрийской глины ($h = 10 \text{ мм}$, $\alpha = 60^\circ$)

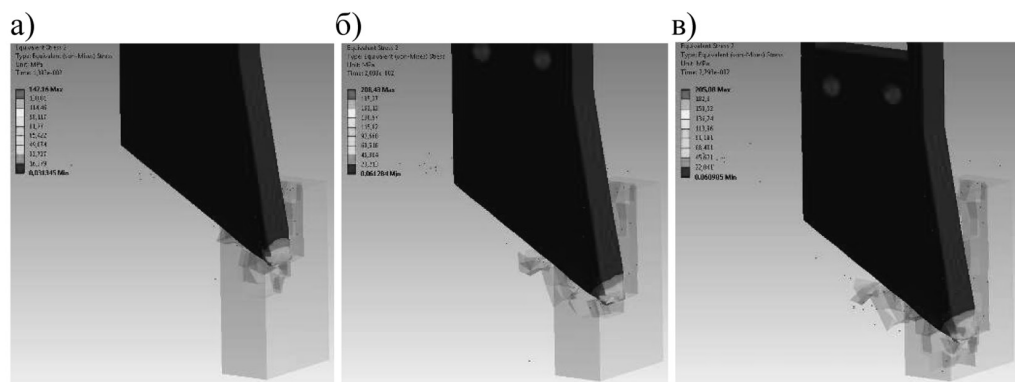


Рис. 3. Распределение напряжений в резце при резании глины

Характер полученных осциллограмм процесса резания в среде ANSYS отражает особенности классических процессов резания горных пород одиночным резцом. На рис. 2 представлена осциллограмма разрушения образца кембрийской глины с параметрами $h = 10$ мм, $\alpha = 60^\circ$.

На рис. 3 показаны области резца и напряжения, воспринимаемые им при резании глины в различные промежутки времени: а) – 2 см, б) – 3 см, в) – 4 см.

Как видно из рис. 3 наиболее нагруженным участком является режущая кромка резца.

На рис. 4 показаны изолинии напряжений возникающие в глине при взаимодействии с ней резца. По ха-

рактеру изолиний можно судить о формировании зоны трещинообразования, предполагаемому направлению ее развития и величине угла развала породы.

Основные закономерности оптимального режима работы исполнительного органа горной машины, прежде всего, определяются рациональными параметрами процесса отделения породы от массива. Все последующие факторы накладывают ограничения и приводят к снижению принятого показателя эффективности. Условием, характеризующим оптимальность процесса отделения породы, должно быть принято достижение наименьших удельных энергозатрат на разрушение породы (глины). В качестве совокуп-

ного режимного параметра, определяющего закономерность изменения удельных энергозатрат при резании, можно принять толщину стружки, так как при резании инструментами удельные энергозатраты гиперболически снижаются с увеличением толщины среза, а каждой толщине среза соответствует определенное значение его ширины, при котором удельные энергозатраты минимальны [2].

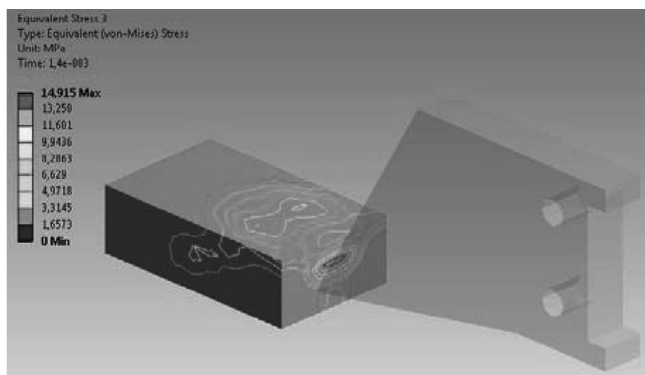


Рис. 4. Распределение напряжений в глине (при внедрении резца в породу)

Методика обработки осциллограмм процесса резания

Обработка данных компьютерного моделирования была произведена методом спектрального анализа [3]. В результате была найдена зависимость изменения удельной энергоемкости разрушения глины от глубины внедрения эталонного резца (рис. 5). По данным, полученным в среде ANSYS, были найдены потери объема глины после прохода резца для вычисления удельных энергозатрат на разрушение.

Расчет удельных энергозатрат процесса разрушения осуществляем по формуле [4]:

$$H_w = 0,0272 \cdot \frac{P_z \cdot L \cdot \rho}{G}, \quad (1)$$

где H_w – удельные энергозатраты процесса резания, кВт·ч/м³; P_z – сила резания, Н; L – длина среза, см; G – вес продуктов разрушения, г; ρ – плотность кембрийской глины в массиве, г/см³.

Из графика (рис. 5) видно, что энергоемкость разрушения глины заметно снижается при толщине стружки в диапазоне 13–15 мм, что позволяет говорить об оптимальном режиме резания при данной величине заглабления. Данное утверждение нуждается в экспериментальной проверке.

Анализ осциллограмм процесса резания кембрийской глины резцом типа ШБМ

В проходческих комплексах и шитах могут применяться резцы, используемые на проходческих комбайнах. Хорошо показали себя резцы ШБМ2С-1-1-04, данный тип режущего инструмента получил широкое распространение в отечественных шитах, в том числе используемых в ОАО «Метрострой» Санкт-Петербург. Державка резца изготовлена из стали 35ХГСА, а твердосплавная вставка из сплава марки ВК-8ВК. Для этих резцов целесообразно принимать скорость резания 1,5–2 м/с при разрушении пород с $f = 4$ –5 и 0,8–1 м/с при $f = 6$.

В связи с этим для определения силовых параметров процесса резания было произведено моделирование разрушения кембрийской глины со скоростями резания реальных исполнительных органов роторного типа, как наиболее эффективных при проходке вспомогательных выработок. Диаметр выработок принимался 6 м (8,5 м).

Материал твердосплавной вставки резца – сплав ВК-8ВК, прочностные и деформационные характеристики сплава представлены в табл. 3.

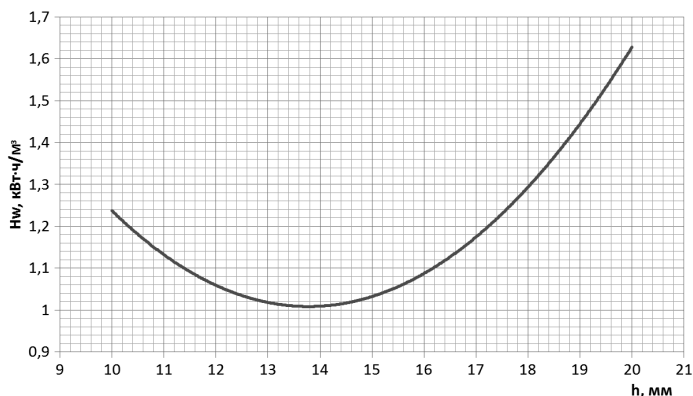


Рис. 5. Зависимость изменения удельной энергоемкости разрушения от глубины внедрения эталонного резца

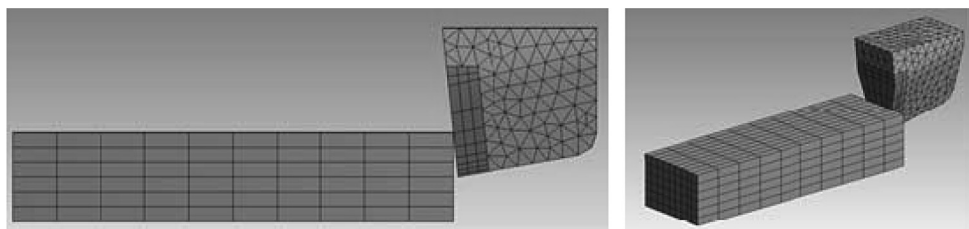


Рис. 6. Конечно-элементная модель резца типа ШБМ с образцом кембрийской глины

Таблица 3

Характеристики прочностных и деформационных свойств сплава ВК-8ВК

Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности на изгиб, МПа
14 500	$6,04 \cdot 10^{11}$	0,215	4240	1600

Таблица 4

Характеристики прочностных и деформационных свойств стали 35ХГСА

Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа
7826	$2,06 \cdot 10^{11}$	0,29	1150	1000

Материал головки резца – закаленная сталь 35ХГСА, ее механические характеристики представлены в табл. 4.

Конечно-элементная модель резца типа ШБМ с трапецевидной режущей кромкой с заглублением 10 мм показана на рис. 6.

По результатам моделирования получены значения усилий на резце в зависимости от глубины его внедрения и скорости резания.

Обработка осциллограмм компьютерного моделирования процесса резания кембрийской глины резцом типа ШБМ позволила построить зависимость изменения удельной энергоемкости разрушения глин от h в зависимости от скорости резания (рис. 7).

Как видно из рис. 7, при малых величинах h удельные энергозатраты закономерно уменьшаются с увеличением глубины внедрения резца в

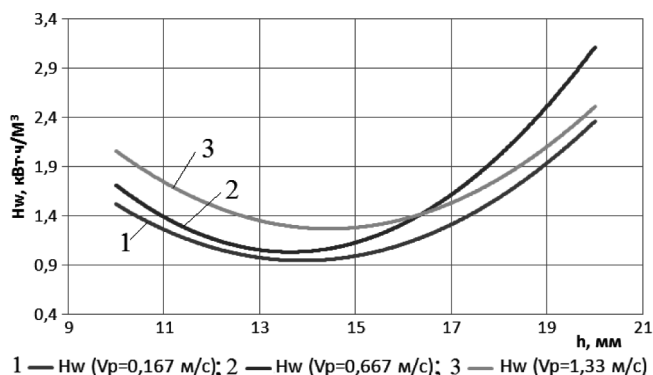


Рис. 7. Зависимость изменения удельной энергоемкости от глубины внедрения резца при разной скорости резания

глину. Затем уменьшение удельных энергозатрат в функции глубины внедрения резца нарушается и происходит их увеличение. Анализируя данный график, можно сделать вывод, что оптимальная толщина стружки h по критерию энергоемкости процесса разрушения глин резанием находится в пределах 13–15 мм. Увеличение толщины стружки свыше указанной величины приведет к заметному увеличению энергоемкости процесса отбойки породы и росту нагрузок на резцах (рис. 8). Вместо экспоненциальной зависимости (по Е.З. Позину [4]) удельных энергозатрат от h график (рис. 7) описывается параболой с минимумом в точке около $h = 15$ мм. Это объясняется особенностями резания глин, у которых для малых толщин стружек (на глубину 10–15 мм) образуется скол шириной более $2 \div 4t$, а затем, при увеличении толщины стружки (глубины внедрения резца), происходит резание только на ширину режущей кромки резца, практически без образования развала породы. Поэтому с ростом h более 15 мм объем скалываемой породы практически не увеличивается («производительность» не растет), а удельные энергозатраты на разрушение глин резанием возрастают. В результате падающая экспонента трансформируется в параболу.

Также из графика (рис. 7) можно сделать вывод о том, что с увеличением скорости нагружения глин увеличивается и энергоемкость процесса резания.

Из графика (рис. 8) видно, что с ростом толщины стружки (глубины внедрения резца) в диапазоне 10–13 мм наблюдается уменьшение усилий резания, в дальнейшем при увеличении толщины стружки растет и усилие резания по линейному закону.

На величину удельных энергозатрат на разрушение породы резанием существенное влияние оказывает и

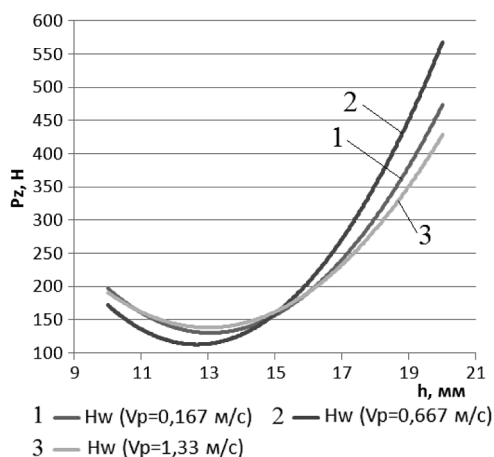


Рис. 8. Зависимость силы резания от толщины стружки при резании резцом типа ШБМ

соотношение размеров среза, ширина t и толщина h .

Шаг резания и толщина стружки играют огромную роль при формировании усилия резания P_z .

Если переписать формулу для определения удельных энергозатрат [4] на резание (1) для t , получим:

$$t = 0,0272 \cdot \frac{P_z}{H_w \cdot h}, \quad (2)$$

где H_w – удельная энергоемкость разрушения, ; P_z – усилие резания, Н; t – шаг резания, см; h – средняя толщина стружки, см.

В ряде работ оптимальный по уровню удельных затрат энергии шаг резания определяется в зависимости от толщины стружки h и ширины резца b_p . Однако при этом не учитывается одна особенность. Если для резцов с прямоугольной режущей кромкой при $t \geq b_p$ фактическая ширина резца остается постоянной и равной ширине главной режущей кромки, то у резцов с трапецевидной и полукруглой режущей кромкой (например, у резцов ШБМ-1 и ШБМ-2) ширина резца является переменной величиной, зависящей от шага резания t и толщи-

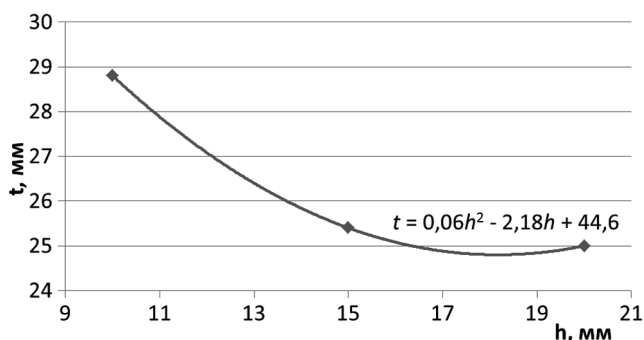


Рис. 9. Зависимость шага резания от толщины срезаемой стружки резцом ШБМ

ны стружки h . Говоря о фактической ширине резца b_p , мы подразумеваем, линейный размер проекции той части режущей кромки, которая находится в контакте с породой, на плоскость резания. Поэтому определение оптимального шага резания для трапециевидных и полукруглых резцов (наиболее распространенных) в зависимости от фактической ширины резца b_p неудобно вследствие затруднительности точного определения последней [5].

По данным компьютерного моделирования резания резцом типа ШБМ с трапециевидной режущей кромкой и с учетом (2) построена зависимость шага резания от толщины стружки (рис. 9).

Зависимость шага расстановки резцов t от толщины стружки h имеет вид:

$$t = 0,06h^2 - 2,18h + 44,6 \quad (3)$$

Данная зависимость для конкретного резца ШБМ с трапециевидной режущей кромкой позволит обеспечить режим разрушения забоя из условия оптимального шага. Из приве-

денного графика (рис. 9) видно, что оптимальный шаг резания для резца ШБМ при котором энергетические затраты на разрушение породы минимальны составил в условиях моделирования 25,4 мм при $h = 15$ мм.

Заключение

В целях оптимизации режимов разрушения кембрийских глин исполнительными органами проходческих комплексов при проходке выработок метро разработана компьютерная модель для исследования процесса резания массива кембрийских глин. Исполнительные органы режущего типа проходческих комплексов с учетом найденных параметров при $h = 15$ мм и величине шага $t = 25,4$ мм будут работать при минимальных значениях удельных энергозатрат на разрушение глин, что позволит повысить производительность отбойки и приведет к повышению темпов проходческих работ при строительстве метро. Данные рекомендации нуждаются в экспериментальной проверке.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Лавренко Сергей Александрович – кандидат технических наук, ассистент кафедры, e-mail: sergey18.09.89@mail.ru,

Труфанова Инна Сергеевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

1. Коршунов В.А., Карташов Ю.М. Новый способ определения предела прочности при растяжении горных пород // Записки горного института. – 2011. – т. 190. – С. 202–206.

2. Михайлов В.Г., Дубянский В.И. Оценка условий резания угля при движении инструмента по циклоидной кривой / Труды Новочеркасского политехнического института. – 1968. – т. 175. – С. 142–147.

3. Адлер, Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при

поиске оптимальных условий. Изд. 2, переработанное и дополненное. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

4. Позин Е.З., Меламед В.З., Тон В.В. Разрушение углей выемочными машинами. – М.: Недра, 1984. – 288 с.

5. Барон Л.И., Глатман Л.Б., Губенков Е.К. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Том I. Научно-методические основы. Разрушение резцовым инструментом. – М.: Наука, 1968. – 216 с. **ПИБ**

UDC 622.233

THEORETICAL STUDIES OF MASS DESTRUCTION CAMBRIAN CLAY CUTTING IN THE COMPUTER ENVIRONMENT ANSYS

Lavrenko S.A.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Chair,
e-mail: sergey18.09.89@mail.ru,

Trufanova I.S.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Chair,

¹ National Mineral Resource University «University of Mines»,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Using ANSYS software environment we consider the problem of destruction of the array of Cambrian clay cutting as a dynamic contact problem of mechanics. Cutting process is presented as a set of processes of elastic-plastic deformation and rock failure in the local area under the influence of the cutting tool. The resulting waveform reflect the real picture of the processes of cutting rocks and the found parameters of cutting conditions will allow to work with minimum values of the specific energy consumption for the destruction of clay that will improve the performance of breaking and lead to higher rates of tunnel works in the construction of the subway.

Key words: cutter, destruction, cambrian clay, effector.

REFERENCES

1. Korshunov V.A., Kartashov Yu.M. *Zapiski gornogo instituta*. 2011, vol. 190, pp. 202–206.

2. Mikhailov V.G., Dubyanskii V.I. *Trudy Novocherkasskogo politekhnicheskogo instituta*. 1968, vol. 175, pp. 142–147.

3. Adler, Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii*. Izd. 2 (Experimental design in optimum conditions search, 2nd edition), Moscow, Nauka, 1976, 280 p.

4. Pozin E.Z., Melamed V.Z., Ton V.V. *Razrushenie uglei vyemochnymi mashinami* (Coal cutting with winning machines), Moscow, Nedra, 1984, 288 p.

5. Baron L.I., Glatman L.B., Gubnikov E.K. *Razrushenie gornykh porod prokhodcheskimi kombainami. Tom I. Nauchno-metodicheskie osnovy. Razrushenie reztsovym instrumentom* (Rock cutting with continuous heading machines. Vol. I. Scientific methodological basis. Breakage by cutting tool), Moscow, Nauka, 1968, 216 p.

