

Е. Н. Шер¹✉, Л. В. Городилов¹

Моделирование скола породы при внедрении клиновидного инструмента под уступ

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ensher@gmail.com

Аннотация. Проведено экспериментальное моделирование процесса скалывания породы при ударе под уступ клиновидного инструмента. Эксперименты проводились в динамическом режиме с использованием ударного стенда с падающим массивным клином. Образцы для испытания изготавливались из песчано-цементной смеси (ПЦС) в виде параллелепипедов. Скол отдельных бетонов из ПЦС производился вертикальным ударом в образец на разных расстояниях T от ребра вертикальной его грани. В экспериментах фиксировались формы отдельных сколов, их габариты и силовые характеристики внедрения клина. В результате большого числа экспериментов были установлены зависимости габаритных размеров скалываемых отдельных сколов и силовых параметров внедрения клина при сколе в зависимости от T . С использованием полученных зависимостей на основе теории балок в работе построены регрессионные формулы для расчетов максимальной силы внедрения клина и энергии, затрачиваемой на скол, в зависимости от T , механических свойств породы и геометрии клина.

Ключевые слова: скол породы, удар под уступ, внедрение клина, горные породы, теория балок, сопротивление внедрению, магистральная трещина

E. N. Sher¹✉, L. V. Gorodilov¹

Modeling rock spalling during wedge-shaped tool penetration under a bench

¹Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ensher@gmail.com

Abstract. Experimental modeling of rock spalling during impact with a wedge-shaped tool under a bench was conducted. The experiments were conducted in dynamic mode using an impact rig with a falling massive wedge. Test specimens were made of sand-cement mixture (SCM) in the shape of parallelepipeds. Spalling of SCM concrete fragments was achieved by vertical impact the wedge into the specimen at different distances T from the edge of its vertical face. The shapes of the fragments, their dimensions, and the force characteristics of wedge penetration were recorded during the experiments. As a result of a large number of experiments, relationships were established between the overall dimensions of the spalled fragments and the force parameters of wedge penetration during spalling as functions of T . Using the obtained relationships based on beam theory, regression formulas are constructed for calculating the maximum wedge penetration force and the energy expended on shear, depending on T , the mechanical properties of the rock, and the wedge geometry.

Keywords: rock shear, impact under a bench, wedge penetration, rocks, beam theory, penetration resistance, main crack

Введение

Клиновидный инструмент широко применяется при многих способах разрушения горных пород, таких как бурение, послойное скалывание, ударное разрушение негабарита. Перспективной технологией отбойки породы на борту карьера является ее послойное скалывание ударниками ковша экскаватора активного действия [1-4]. Достаточно хорошо исследованной проблемой является определение формы и размеров плоской магистральной трещины, возникающей при нормальном ударе клиновидного инструмента по свободной поверхности хрупкого твердого тела. В последнее время была разработана теоретическая модель, описывающее это явление в трехмерной постановке [5], и проведены экспериментальные исследования.

Задача теоретического определения формы отдельности, отбитой при ударе клиновидного инструмента под уступ породы в трехмерной постановке в настоящее время далека от решения. В настоящей работе проведено физическое моделирование скалывания породы при ударе под уступ. Схематически процесс последовательного скалывания изображен на рис.1а. Штриховые линии на нем показывают условно форму трещин, возникающих в породе при внедрении в нее клина и отделяющих от нее отдельности.

Основной задачей описания этого процесса является определение силовых характеристик воздействия клина, пространственной формы отбитой породы и ее характерных размеров. Нами были проведены эксперименты по определению таких параметров в упрощенной конфигурации воздействия клина на пространственный образец, изготовленный из песчано-цементной смеси (ПЦС). Схема эксперимента представлена на рис.1б. Клин внедряется вертикально рядом с боковой гранью образца, параллельно ей.

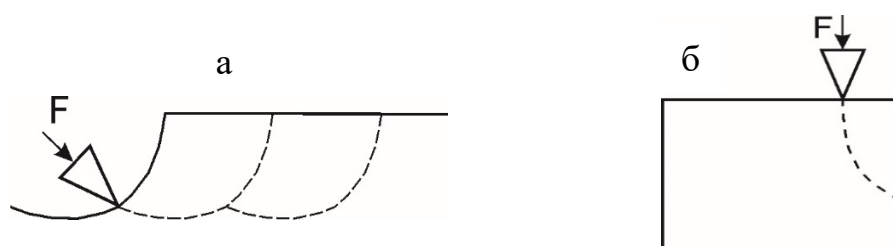


Рис. 1. Схема скола при воздействии клина под уступ (а) и на образец породы (б)

Внедрение массивного клина проводилось динамически в результате его падения в струнном копре.

На рис. 2. приведено фото блока из ПЦС и отколотой падающим клином отдельности. Размеры отдельностей определялись расстоянием T линии внедрения клина от ближайшего ребра блока. При этом формы отдельностей при разных T были в значительной мере подобны. Размеры отдельностей определялись максимальными значениями ширины $Ш$, высоты $В$ и толщины $Т$



Рис. 2. Фото блока из ПЦС и отколотой падающим клином отдельности

Зависимости ширины и высоты отдельностей от ее толщины, полученные в результате их скола на ударном стенде, приведены в виде графиков на рис.3. В экспериментах на ударном стенде использовался массивный клин массой 2,3 кг, длиной острой кромки $2L=28\text{мм}$ и полууглом приострения $\alpha = 15^\circ$.

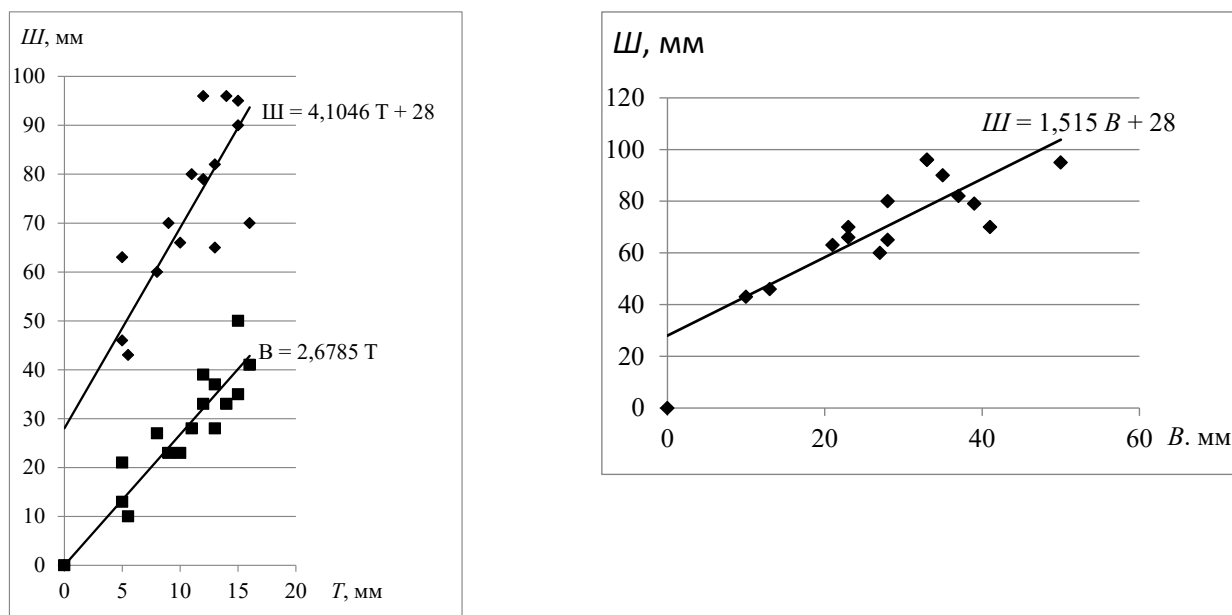


Рис. 3. Соотношения ширины $Ш$, высоты $В$ и толщины $Т$ осколка, отбиваемого клином на краю верхней грани блока из ПЦС на ударном стенде

В результате экспериментов на ударном стенде получены усредненные зависимости, связывающие ширину $Ш$ и высоту $В$ осколка с толщиной $Т$

$$Ш=4.1Т+28; \quad В=2.7Т; \quad Ш=1.5В+28 \quad (1)$$

В динамических экспериментах проводилась запись торможения клина при его внедрении в образец. По значению ускорения и массе клина определялась сила торможения во времени. Дополнительно, интегрированием осциллограммы ускорения определялось изменение скорости клина. Пример записи осциллограмм

ускорения и скорости клина в эксперименте X приведен на рис. 4. Красная кривая на рис.4 а – сигнал акселерометра после ФНЧ.

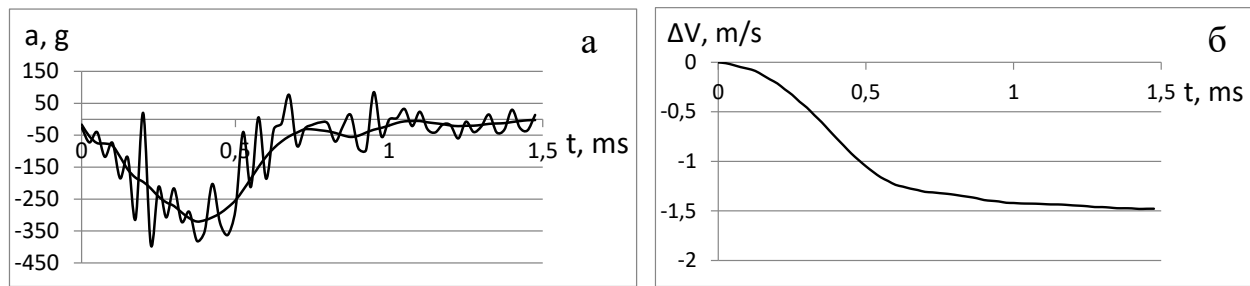


Рис. 4. Осциллограммы ускорения (а) и скорости внедрения клина (б) при ударе по верхней грани образца из ППС в эксперименте 01-11-2025.

По значениям предударной скорости клина V_0 и ее изменению в процессе взаимодействия клина и образца ΔV удастся из закона сохранения энергии определить энергию ΔW , затраченную на откол отдельности или на необратимую деформацию и развитие трещины в образце, если откол не произошел:

$$\Delta W = \frac{m}{2} [V_o^2 - (V_0 + \Delta V)^2] \quad (2)$$

По данным экспериментов графики зависимостей максимального значения силы торможения клина $F_{\max}$ и затраченной на откол энергии W от толщины скола T приведены маркерами на рис. 5а, б. Кривыми 1 на этих рисунках приведены регрессионные зависимости, построенные по теоретическим оценкам, приведенным ниже в этой статье.

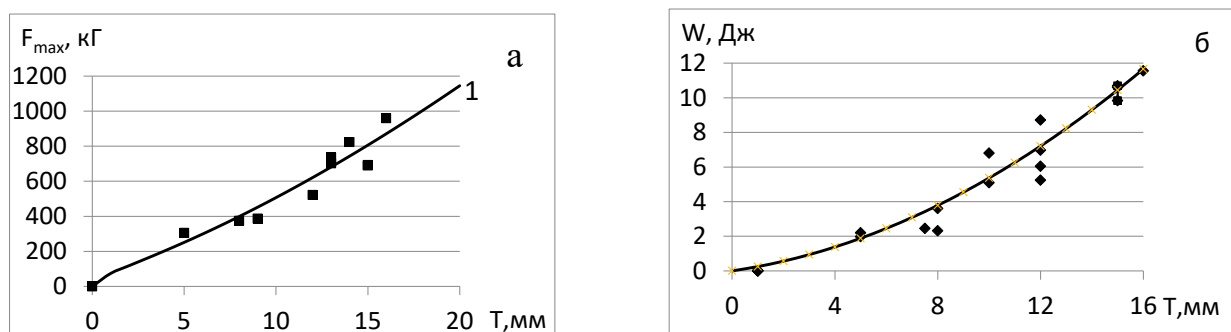


Рис. 5. Зависимости максимального значения силы сопротивления внедрению клина $F_{\max}$, кГ (а) и суммарной энергии ударов W , Дж, вызвавших его скол от толщины осколка (б) при ударах на разных расстояниях T от ребра образца.

В дополнение к экспериментам в работе получены приближенные аналитические оценки значений силы при внедрения клина в зависимости от толщины T скальваемой отдельности. При рассмотрении задачи о сколе отдельности толщиной T вблизи края образца в качестве приближенного решения при малом внедрении клина можно использовать решения о внедрении клина в хрупкую среду в 2D и 3D постановках [6-7], а также взять решение задачи о расщеплении пластины толщиной $2T$ дисковой трещиной, нагруженной центральными сосредоточенными силами P в осесимметричной постановке. Такое решение приведено в [8]. Согласно этому решению $P = 8\pi K_{IC} \sqrt{T^3 / 3}$. Такому значению силы, раскрывающей осесимметричную трещину при расщеплении пластины, соответствует сила сопротивления внедрению клина [3]

$$F = 8\pi k(\alpha, \mu) K_{IC} \sqrt{T^3 / 3}, k(\alpha, \mu) = \frac{\operatorname{tg}(\alpha) + \mu}{1 - \mu \operatorname{tg}(\alpha)}, \quad (3)$$

где μ - коэффициент трения клина о породу, K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений около вершины трещины.

Заметим, что эта сила не зависит от размера радиуса трещины. Отсюда следует, что после достижения силы внедрения клина этого значения расщепление пластины продолжится до бесконечности в случае мягкого нагружения. Зависимость, определяемая формулой (3), при $K_{IC} = 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$, $\mu = 0.3$ и значении полуугла заострения клина $\alpha = 15^\circ$ приведена на рис.6 кривой 1: $F_{\text{теор}} = 0.284 T^{3/2}$.

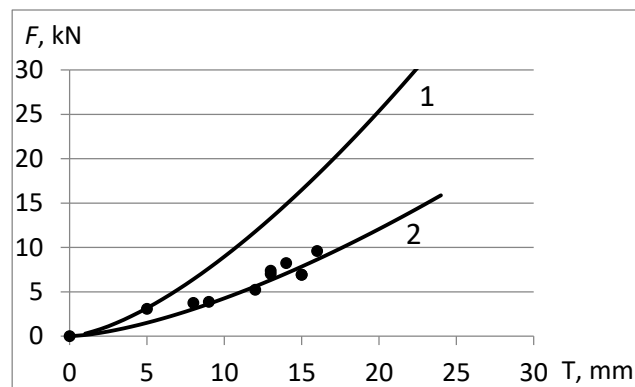


Рис. 6. Расчётная зависимость силы скола отдельности от ее толщины—кривая 1, полученная по формуле (3) и экспериментальные зависимости максимального значения силы внедрения клина при сколе отдельности, полученные в экспериментах на ударном стенде – маркеры и интерполяционная кривая 2

Экспериментальные значения максимальной силы, зафиксированные на ударном стенде при внедрения клина при сколе отдельности толщиной T [mm] на образце из ПЦС в форме параллелепипеда приведены на рис. 6 черными

маркерами, кривой 2 приведена интерполяционная зависимость, приближающая эти данные эксперимента: $F_{int} = 0.135 T^{3/2}$. Такое экспериментальное значение меньше теоретического (3) в 2,1 раза при использовании в расчетах значение КИН: $K_{IC} = 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$ и параметров клина $\alpha = 15^\circ$, $\mu = 0,3$. Для уточнения отношения теоретических оценок по формуле (3) максимальных значений сил внедрения клина и экспериментальных данных требуется определение КИН бетона, используемого в экспериментах и коэффициента трения клина о породу.

Отличие экспериментальных значений максимального значения силы внедрения клина при сколе отдельности на краю образца от теоретической оценки, полученной в задаче о распространении плоской дисковидной трещины в пластине, может объясняться тем, что при сколе отдельности отделение ее от массива происходит в результате разворота трещины к свободной поверхности в условиях изгибающего воздействия внедряющегося клина. На фото рис. 2 видно, что в области под клином откольная трещина развивается в плоскости, параллельной свободной поверхности грани образца, вдоль которой производился скол. При дальнейшем внедрении клина трещина разворачивается к свободной поверхности, в тоже время распространяясь вдоль нее. Такое поведение трещины отмечалось ранее при решении задачи о развитии осесимметричной трещины гидроразрыва рядом со свободной поверхностью. На рис.7 приведены формы таких трещин, развивающихся на разном расстоянии от свободной поверхности. [9]

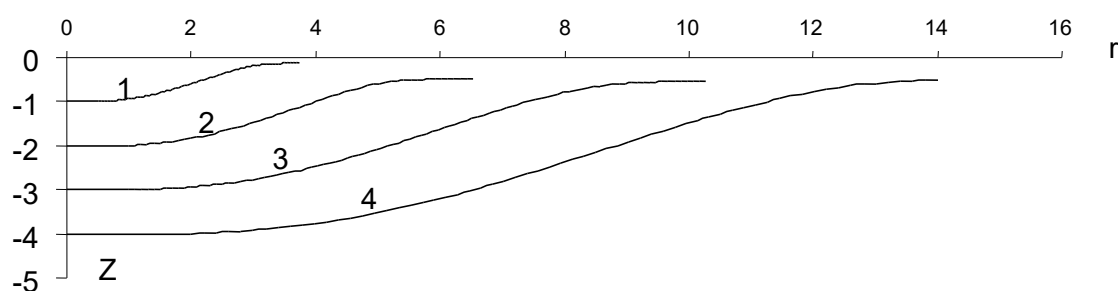


Рис. 7. Расчетные формы трещин гидроразрыва в зависимости от глубины h расположения начальной трещины.

Как видно, подобная траектория трещины наблюдается на горизонтальной поверхности образца при вертикальном внедрении клина рядом с его вертикальной свободной гранью (рис.3). По-другому происходит рост трещина под клином. Сначала она развивается вертикально вниз, а затем разворачивается более круто, чем при распространении вдоль горизонтальной поверхности, к свободной вертикальной грани и обеспечивает скол отдельности. Такое поведение трещины можно объяснить влиянием изгибных деформаций на нижней границе образующейся отдельности под внедряющимся клином. Оценку отламывающего усилия можно сделать рассмотрев отдельность как балку шириной III , длиной, равной высоте отдельности B и толщиной T , защемленную на нижней границе с

блоком породы и нагруженную на верхнем торце силой Fx , создаваемой внедряющимся клином (рис. 8).

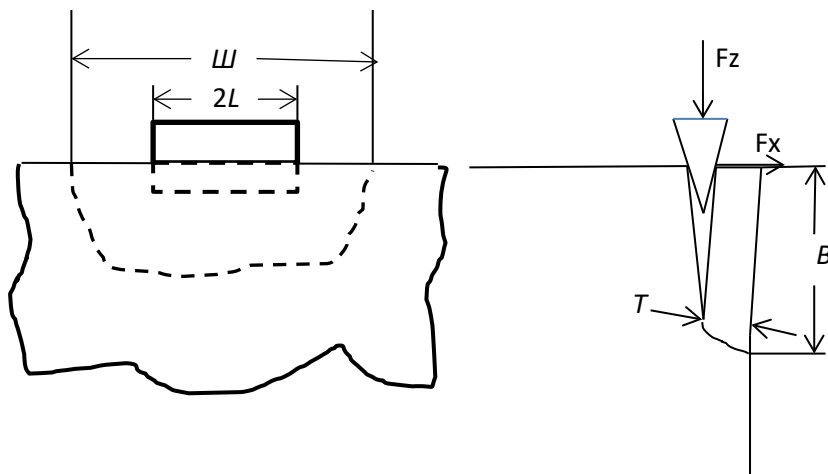


Рис. 8. Схема скола отдельности от блока породы при внедрении клина рядом с боковой гранью

Согласно теории изгиба балок смещение свободного торца рассматриваемой балки и силы ее раскрывающей определяются соотношениями [10-11]:

$$u = \frac{4Fx}{E} \cdot \frac{B^3}{3T^3}, \quad Fx = \frac{K_{IC} 3\sqrt{T^3}}{2\sqrt{3}B} \quad (4)$$

Отсюда и из (1) следует, что критическое значение энергии, затраченной на скол отдельности толщиной T равно

$$W_{cr}(T) = \frac{K_{IC}^2}{1,09E} (4,1T^2 + 28T)$$

Это выражение можно использовать для установления регрессионной связи между экспериментальным значением энергии, идущей на скол при ударе клином и величиной толщины, скалываемой отдельности: $W_r(T) = rW_{cr}(T)$.

График такой функции, достаточно хорошо аппроксимирующей экспериментальные данные, приведен кривой линией на рис. 5 б, рассчитанной при $K_{IC} = 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$, $E = 10^{10} \text{ Па}$, $r = 170$. Отсюда следует, что на развитие откалывающей отдельности трещины при ударе клина уходит 0,6% затрачиваемой на скол энергии.

Используя формулы (4) и (1), можно получить оценку величины максимальной силы внедрения клина F при сколе отдельности падающим клином в зависимости от толщины отдельности T .

$$F_m(T) = 2k(\alpha, \mu)Fx(T) = 2k(\alpha, \mu) \frac{K_{IC} T^{3/2}}{2\sqrt{3}} \left(\frac{1.5B + 28}{B} \right), \quad B=2,7T \quad (5)$$

Построенная по этой формуле регрессионная зависимость $F_r(T) = pF_m(T)$ при $p=0,565$ и приведенная на рис.5а кривой 1, достаточно хорошо аппроксимирует экспериментальные данные. Отметим, что отношение теоретической оценки силы внедрения клина при сколе к экспериментальному значению, полученные по формулам (3) и (5), соответствующим моделям расслоения пластины и балки, отличаются незначительно: 2.1 и 1.8.

Заключение

В результате проведенных динамических экспериментов на ударном стенде по сколу отдельности при внедрении клина в образец из ППС рядом с боковой гранью были получены данные о соотношении характерных размеров отдельности: ее ширине $Ш$, высоте B и толщине T . После усреднения данных установлены следующие зависимости:

$$Ш=4.1T+2L; \quad B=2,7T; \quad Ш=1,5B+2L,$$

где L – полудлина кромки клина

По условию геометрического моделирования эти формулы могут использоваться для оценки размеров скалываемой отдельности при ударе клиновидным инструментом с размером режущей кромки $2L$ под уступ высотой T . Для оценки силовых параметров, обеспечивающих скол клином уступа толщиной T предложены зависимости силы, необходимой для скола, и затрат энергии при ударах.

$$F(T) = r \cdot k(\alpha, \mu) \frac{K_{IC} T^{1/2}}{\sqrt{3}} \left(1.5T + \frac{2L}{2,7} \right), \quad r=0,564$$

$$W(T) = \frac{pK_{IC}^2}{1,09E} (4,1T^2 + 2LT), \quad p=170$$

Полученные в статье соотношения могут быть полезны при проектировании работ и механизмов по разрушению горных пород при бурении, послойном скалывании, обработке камня. В дальнейшей работе по рассматриваемой проблеме предполагается проведение измерения применительно к проведенным экспериментам всех параметров, входящих в полученные формулы. Это позволит уточнить значения поправочных коэффициентов, входящих в них. Кроме этого желательно проведение подобных экспериментов в квазистатических условиях нагружения на других материалах и в другом масштабе.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования РФ (№ гос. регистрации 124020700085-5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маттис А. Р., Ческидов В. И., Яковлев В. Л., Новопашин М. Д., Лабутин В. Н. Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 335 с.
2. Городилов Л. В., Лабутин В. Н. Перспективы создания ковшей активного действия к гидравлическим строительным экскаваторам // Материалы V Междунар. науч. симп. “Ударно-вибрационные системы, машины и технологии”, 23–25 апреля 2013 г. – Орел: Орел ГТУ, 2013. – С. 112–119.
3. Крюков Г. М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. – Т. 1. – М.: Горн. кн., 2006. – 330 с.
4. Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. – М.: ЛКИ, 2010. – 224 с.
5. Шер Е. Н. Численная оценка сопротивления внедрению клиновидного инструмента в хрупкий породный массив с учетом равновесного развития магистральной трещины // ФТПРПИ. – 2021. – № 6. – С. 85–94.
6. Шер Е. Н., Расчет в двумерной постановке внедрения клина в хрупкую среду с учетом развития магистральной трещины // «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» СЕКЦИЯ 3: Современные проблемы горнодобывающей промышленности». –2025-T2.1. стр.223-230.
7. Башеев Г.В., Ефимов В.П., Мартынюк П.А. Расчетная модель разрушения горных пород клиновидным ударным инструментом // ФТПРПИ. – 1999 - №5 – с. 53-61.
8. Ю.Н. Работнов, Механика деформированного твердого тела, М: «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, 1988.
9. Шер Е.Н., Михайлов А.М. Моделирование роста осесимметричных трещин при взрыве и гидроразрыве вблизи свободной поверхности// ФТПРПИ, 2008, № 5
10. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теория упругости, М: «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, 1987.
11. Л.И. Слепян, Механика трещин.-Л: Судостроение, 1981,-296 С.

© Е. Н. Шер, Л. В. Городилов, 2026