

УДК 622.23.05

## **ЖАҢЫ КОНСТРУКЦИЯДАГЫ ШЫНААЛУУ ТҮЗҮЛҮШ МЕНЕН КАТУУ МАТЕРИАЛДЫ ЖАРУУЧУ КҮЧТӨРДҮ АНЫКТОО**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСКАЛЫВАЮЩИХ СИЛ ПРИ РАСКОЛЕ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА КЛИНОВЫМ УСТРОЙСТВОМ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ**

## **DETERMINATION OF SPLITTING FORCES WHEN SPLITTING A SOLID MATERIAL WITH A WEDGE DEVICE OF A NEW DESIGN**

*Ж. Усубалиев, К. Т. Эликбаев, Н. Н. Кынатбекова*  
*J. Usubaliev, K. T. Elikbaev, N. N. Kynatbekova*

*Бул эмгекте продукциянын натыйжалуулугун жана сапатын жогорулатууга мүмкүндүк берүүчү жаңы конструкциядагы шынаалуу жарып-бөлүүчү түзүлүштү колдонуу менен бургу-шынаалуу ыкманын мисалында ири ташты тоо тулкусунан ажыратып алууда катуу материалды жаруучу күчтөрдүн чоңдугун эсептөө ыкмасы иштелип чыкты. Сунушталган шынаалуу жарып-бөлүүчү түзүлүштүн иштеткичи катары энергия булагынын ар кандай түрлөрүн (гидро-, пневмо-матикалык ж.б.) колдонууга болот. Багыттап жарып-бөлүү үчүн сунушталган конструкция салттуу гидравликалык шынаалуу түзүлүштөрдөн айырмаланат, анткени жарып-бөлүүчү башы учталган жумушчу бети бар эки кошумча керилме жаак менен жабдыланган. Кошумча керилме жаактар негизги жаакка өз ара тик бурчтуу жайгашкан жана жаруу тегиздигине багытталган, жараканын пайда болуусун тездетет жана таш блогун багыттап жарып-бөлүүнү камсыздайт, бул акырында продукциянын сапатын жаакшыртат жана калдыктарды азайтат.*

*В данной работе разработана методика расчета величины развиваемого раскалывающего усилия для раскола твердого материала при отделении блока камня от массива на примере буроклинового способа при применении клинового раскалывающего устройства новой конструкции, позволяющей повысить эффективность и качество изделия. В качестве привода для предлагаемой конструкции клинового раскалывающего устройства возможно применение различных типов источника энергии (гидро-, пневмо- и др.). Предлагаемая конструкция для направленного раскола отличается от традиционных гидравлических клиновых устройств тем, что раскалывающая головка снабжена двумя дополнительными раз-*

движными щеками, имеющими заостренную рабочую поверхность. Дополнительные раздвижные щеки расположены взаимно перпендикулярно к основным щекам и направлены в плоскость раскола и ускоряет момент возникновения трещины и обеспечивают направленный раскол каменного блока, что в конечном счете повышает качество продукции и снижает отходы.

*In this paper, a method has been developed for calculating the magnitude of the developing splitting force for splitting a solid material when separating a block of stone from an array using the example of a wedge method using a wedge splitting device of a new design, which makes it possible to increase the efficiency and quality of the product. As a drive for the proposed design of the wedge splitting device, it is possible to use various types of energy source (hydro, pneumatic, etc.). The proposed design for directional splitting differs from traditional hydraulic wedge devices in that the splitting head is equipped with two additional sliding jaws with a pointed working surface. Additional sliding cheeks are located mutually perpendicular to the main cheeks, and directed in the split plane, accelerate the moment of crack initiation and make it possible to obtain a directed split of the line, which ultimately improves the quality of the product and reduces waste.*

**Түйүн сөздөр:** гидро-шынаалуу түзүлүш, катуу материал, октук күч, жарылуу сызыгы, жарып-бөлүүчү башча, керилме жаак, жаруучу күч, сүрүлүү, учталуу бурч, бургу көзөнөк.

**Ключевые слова:** гидроклиновое устройство, твердый материал, осевое усилие, линия раскола, расклинивающая головка, раздвижная щека, раскалывающая сила, трение, угол заострения, шпур.

**Keywords:** hydro wedge device, hard material, axial force, split line, splitting head, sliding jaw, splitting force, friction, taper angle, hole.

В данной работе рассматривается получение направленного раскола твердого материала (в данном случае – природного камня) клиновым устройством (рис. 1 а), имеющим четыре раздвижные щеки: две основные и две дополнительные (рис. 1 б), расположенные взаимно перпендикулярно в расклинивающей головке. Конструкция расклинивающей головки клинового устройства аналогична закладной части гидравлического клинового устройства (рис. 2), за исключением дополнительных щек. Принцип работы также аналогичен, когда при движении поршня гидроцилиндра клин, находящийся внутри раздвижных щек, приводит их в движение по направлению расклинивания. Здесь стоит отметить, что в качестве привода порш-

ня возможен любой источник энергии (пневматический, электрический, гидравлический, грузовой и др.).

Целью работы является определение усилий, приводящих к разрушению твердого материала. Для наглядности изложения материала в качестве примера остановимся на отделении блока природного камня от массива, когда требуется получить направленный раскол твердого материала. При анализе способов получения блоков камня в работах [1, 2] установлено, что наиболее эффективным способом для этого является буроклиновой способ.

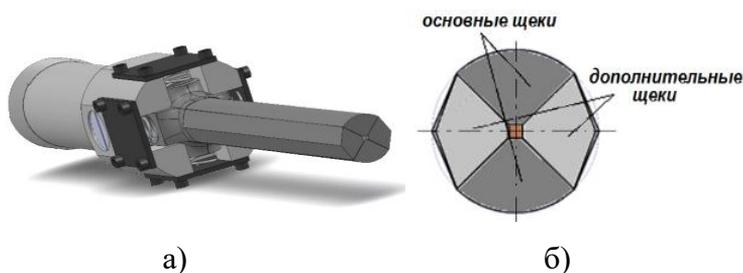


Рисунок 1 – Клиновое устройство: а) общий вид расклинивающей головки; б) раздвижные щеки



Рисунок 2 – Гидравлическое клиновое устройство

Как известно, при этом способе отделения блока природного камня заданных габаритов ( $L_0 \times b \times h$ ) (рис. 3а), согласно ГОСТу 9479-84 (СТ СЭВ 6315-88), в заранее пробуренные неглубокие шпур (глубиной до 500 мм и с шагом  $l=250 - 300$  мм) вставляются расклинивающие головки гидравлических клиньев (комплект из не менее 5 гидроклиньев) (рис. 3 б).

Для отделения блока камня от массива в ранее пробуренные по намеченной линии раскола шпуры устанавливаются расклинивающие головки гидравлических клиновых устройств. Причем ориентирование основных раздвижных щек направлено перпендикулярно плоскости раскола (в плоскости  $y - z$ ), а дополнительных щек вдоль плоскости раскола (в плоскости  $x - z$ ) (рис.3 б, 4 б).

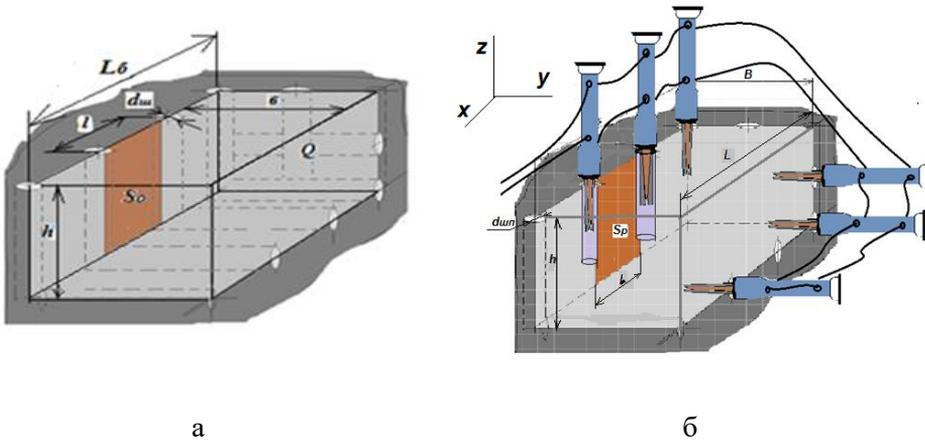


Рисунок 3 – Схема отделения блока камня от массива  
 а) размеры блока, б) схема установки гидроклиньев

Для наглядности представления направления действующих усилий, возникающих от осевой силы  $F_o$ , действующей на шток (соединенного с клином), составим схему действия разжимающих сил (рис. 4), где их разложим по координатным осям  $x, y, z$ . С целью упрощения аналитических выкладок дальнейшие расчеты проведем с допущением, что материал раскалываемого камня однороден, условия действия сил на основных и дополнительных щеках идентичны.

Для того, чтобы понять, откуда возникли раздвигающие силы  $R_{1y}, R_{2y}, R_{3x}$  и  $R_{4x}$ , воспользуемся схемой разложения осевой силы  $F_o$  (рис. 5). При продольном перемещении клина из-за наличия угла заострения  $\alpha$  для всех четырех сопрягаемых граней клина и поверхностях основных и дополнительных щек в плоскостях  $z-y$  и  $z-x$  возникают нормальные к плоскости сопряжения усилия  $N_1=N_2=N_3=N_4$ , направленные противоположно друг другу (рис. 5а, б).

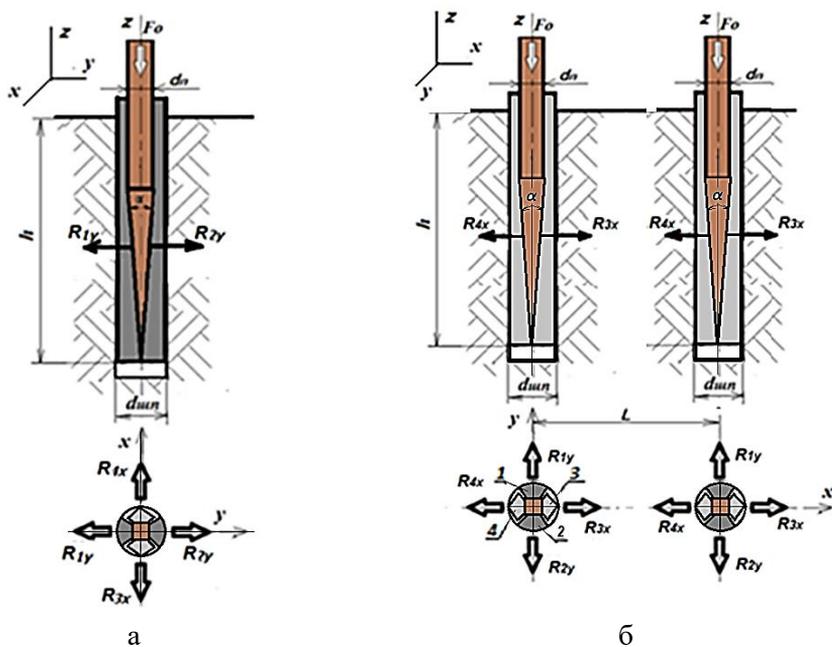


Рисунок 4 – Схема действия сил при расколе камня:  
 а) в плоскости раскола ( $z - y$ ),  
 б) в перпендикулярной плоскости раскола ( $z - x$ )

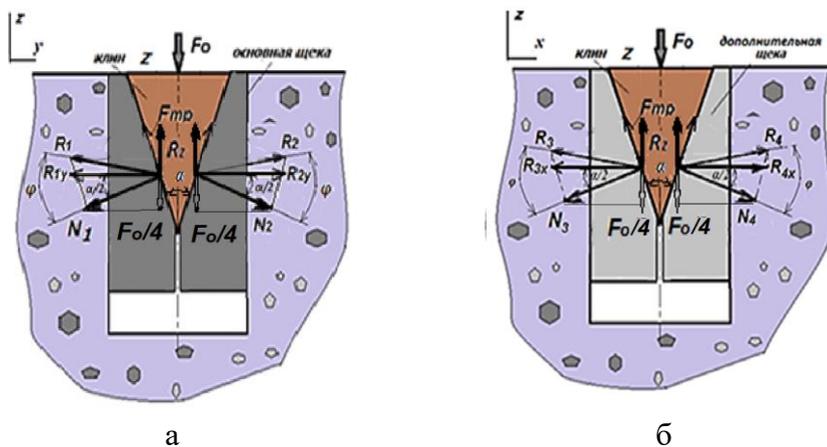


Рисунок 5 – Схема разложения осевой силы  $F_o$ : а) в плоскости раскола ( $z - y$ ); б) в плоскости раскола ( $z - x$ )

$$N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = \frac{F_o - R_z}{4 \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (1)$$

где  $R_z$  – проекция силы трения  $F_{mp}$  на ось  $z$ ;

$$R_z = F_{mp} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = f \cdot N_i \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

Здесь  $F_{mp}$  – сила трения между клином и щеками:  $F_{mpi} = f \cdot N_i$ ;

$f$  – коэффициент трения граней клина о поверхность щек, зависящий от материалов и наличия смазки.

При движении клина на поверхностях раздвижных щек и клина между равнодействующей  $R_i$  возникает угол трения  $\varphi$ , величина которого находится в интервале  $0 \leq \varphi \leq \varphi_{max}$  (рис. 5) и определяется по известной формуле:

$$tg \varphi_{max} = \frac{F_{mp}}{N_i} = \frac{f \cdot N_i}{N_i} = f$$

Или  $\varphi = arctgf$ .

Взаимосвязь равнодействующей силы  $R_i$ , нормальной силы  $N_i$  и силы трения  $F_{mp}$  выражены зависимостью:  $R_i = \frac{N_i}{\cos \varphi} = \frac{F_{mp}}{\sin \varphi}$ .

Как видно из рисунка 5, реактивная сила  $R_z$  препятствует действию осевой силы  $F_o$ , и численно её можно определить ниже следующим образом. При подстановке значений  $N_i$  из зависимости (1) в формулу (2) получим:

$$R_z = f \cdot N_i \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = \frac{(F_o - R_z) \cdot f \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}{4 \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{(F_o - R_z) \cdot f}{4 tg \frac{\alpha}{2}} = \frac{F_o \cdot f}{4 tg \frac{\alpha}{2}} - \frac{R_z \cdot f}{4 tg \frac{\alpha}{2}},$$

вынесем величину  $R_z$  в левую часть:

$$R_z + \frac{R_z \cdot f}{4 tg \frac{\alpha}{2}} = \frac{F_o \cdot f}{4 tg \frac{\alpha}{2}}, \rightarrow R_z \left( 1 + \frac{f}{4 tg \frac{\alpha}{2}} \right) = \frac{F_o \cdot f}{4 tg \frac{\alpha}{2}}$$

Отсюда окончательно имеем:

$$R_z = \frac{F_0 \cdot f}{4tg \frac{\alpha}{2} \left( 1 + \frac{f}{4tg \frac{\alpha}{2}} \right)} = \frac{F_0 \cdot f}{4tg \frac{\alpha}{2} + \frac{4tg \frac{\alpha}{2} f}{4tg \frac{\alpha}{2}}} = \frac{F_0 \cdot f}{4tg \frac{\alpha}{2} + f}. \quad (3)$$

Усилия  $R_{1y}$  и  $R_{2y}$  являются работающими на раскол в плоскости  $z$ - $y$ , перпендикулярной линии раскола, равные по величине и противоположные по направлению (рис. 5 а), а усилия  $R_{3x}$  и  $R_{4x}$ , действующие в плоскости  $z$ - $x$ , также равны по величине вышеприведенным усилиям (рис. 5 б), которые можно определить как:

$$R_{1y} = -R_{2y} = R_{3x} = -R_{4x} = N_i \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = \frac{F_0 - R_z}{4 \sin \frac{\alpha}{2}} \cos \frac{\alpha}{2} = \frac{F_0 - R_z}{4tg \frac{\alpha}{2}}. \quad (4)$$

Подставив зависимость (3) в последнее уравнение, найдем величину раскалывающих усилий основных щек  $R_{1y}$  и  $R_{2y}$  для одного гидравлического клинового устройства:

$$R_{1y} = -R_{2y} = \frac{F_0 - \frac{F_0 \cdot f}{4tg \frac{\alpha}{2} + f}}{4tg \frac{\alpha}{2}} = \frac{F_0 \left( 1 - \frac{f}{4tg \frac{\alpha}{2} + f} \right)}{4tg \frac{\alpha}{2}} = \frac{F_0}{4tg \frac{\alpha}{2}} \left( 1 - \frac{f}{4tg \frac{\alpha}{2} + f} \right)$$

Решая далее, имеем:

$$R_{1y} = -R_{2y} = \frac{F_0}{4tg \frac{\alpha}{2}} \left( \frac{4tg \frac{\alpha}{2} + f - f}{4tg \frac{\alpha}{2} + f} \right) = \frac{F_0}{4tg \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{4tg \frac{\alpha}{2}}{4tg \frac{\alpha}{2} + f} = \frac{F_0}{4tg \frac{\alpha}{2} + f}. \quad (5)$$

В данной зависимости численное значение в скобках ввиду малости по величине в проектировочных расчетах существенного значения не имеет. Если же есть необходимость в учете влияния коэффициентов трения, то в таблицах 1 и 2 приведены их значения для различных материалов.

Рассмотрим подробнее действие дополнительных щек, имеющих заострение под углом  $\gamma$  (рис. 6). Следует заметить, что геометрия рабочих поверхностей дополнительных щек, взаимодействующих с породой, может быть выполнена в виде дуги окружности, плоскими и др. формами. Но с точки зрения получения направленного раскола наиболее эффективным является их пирамидальность с углом заострения.

Как было сказано выше, при движении клина, имеющего четыре грани под одинаковым углом заострения  $\alpha$ , основные и дополнительные раздвижные щеки одновременно приводятся в движение поперечно движению клина. При этом основные щеки работают только на разрыв (раскол), а дополнительные щеки, имеющие ребро заострения, внедряясь в материал, работают как клинья, где раздвигающие силы  $R_{3x}$  и  $R_{4x}$  создают на гранях щек нормальные усилия  $N'_3, N'_4$  (рис. 6). При этом на поверхностях щек возникают силы трения  $F'_{mp}$  металла о породу.

Здесь следует отметить, что приведенная ранее сила  $F_{mp}$  – это сила трения «металл по металлу», а сила  $F'_{mp}$  – это сила трения «металл по породе», соответственно и коэффициенты трения  $f$  и  $f'$  у них отличаются. Для полноты изложения в таблицах 1 и 2 приведены коэффициенты трения для обоих случаев. Так, например, коэффициенты трения «сталь по чугуноу»  $f = 0,15 \div 0,3$  таблица 1[1] и «металл по гранитной породе»  $f' = 0,47 \div 0,55$  [2].

Нормальные силы на гранях дополнительных щек 3 и 4 определяются аналогично зависимости (1) с той лишь разницей, что здесь силы  $R_{3x}$  и  $R_{4x}$  действуют только на две грани щеки и угол заострения равен  $\gamma$  (рис. 6):

$$N'_3 = \frac{R_{3x}}{2 \sin \frac{\gamma}{2}}, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – угол заострения граней дополнительных щек. Причем  $N'_3 = N'_4$ .

Таблица 1 – Коэффициенты трения покоя и скольжения

Трущиеся материалы	Коэффициент трения			
	Покоя		Скольжения	
	Без смазки	Со смазкой	Без смазки	Со смазкой
Сталь – сталь	0,15	0,1 – 0,12	0,15	0,05 – 0,1
Сталь – мягкая сталь	-	-	0,2	0,1 – 0,2
Сталь – чугун	0,3	-	0,18	0,05 – 0,15
Сталь – бронза	0,12	0,08 – 0,12	0,10	0,07 – 0,10
Сталь – текстолит	-	-	-	0,02 – 0,06
Чугун – бронза	-	-	0,15 – 0,2	0,07 – 0,15
Бронза – бронза	-	0,1	0,2	0,07 – 0,1
Резина – чугун	-	-	0,8	0,5
Металл – дерево	0,5 – 0,6	0,1 – 0,2	0,3 – 0,6	0,1 – 0,2
Кожа – металл	0,3 – 0,5	0,15	0,6	0,15

Таблица 2 – Коэффициенты трения покоя металла о породу

Порода	Поверхность породы		
	Сухая	Смочена водой	Покрыта глинистым раствором $\gamma=1,18 - 1,22 \text{ г/см}^3$ , $T=25 - 28 \text{ сек}$
Глина жирная	0,14 – 0,18	0,08 – 0,12	0,06 – 0,09
Глина песчаная	0,25 – 0,28	0,20 – 0,26	0,18 – 0,22
Глинистый сланец	0,20 – 0,25	0,15 – 0,20	0,11 – 0,13
Мергель	0,20 – 0,27	0,18 – 0,25	0,20 – 0,24
Известняк	0,35 – 0,40	0,33 – 0,38	0,31 – 0,35
Доломит	0,38 – 0,42	0,36 – 0,40	0,36 – 0,38
Ангидрит	-	0,39 – 0,40	0,37 – 0,40
Песчаник слабоцементированный: зерна остроконечные зерна окатаны	0,32 – 0,42	0,27 – 0,40	0,25 – 0,35
		0,22 – 0,34	0,17 – 0,25
Песчаник крепкий	0,43 – 0,48	0,43 – 0,45	0,40 – 0,43
Кварцит	0,46 – 0,48	0,48 – 0,50	0,42 – 0,44
Гранит	0,47 – 0,55	0,46 – 0,53	0,45 – 0,50
Каменный уголь	0,38 – 0,42	0,33 0,36	0,30 – 0,33

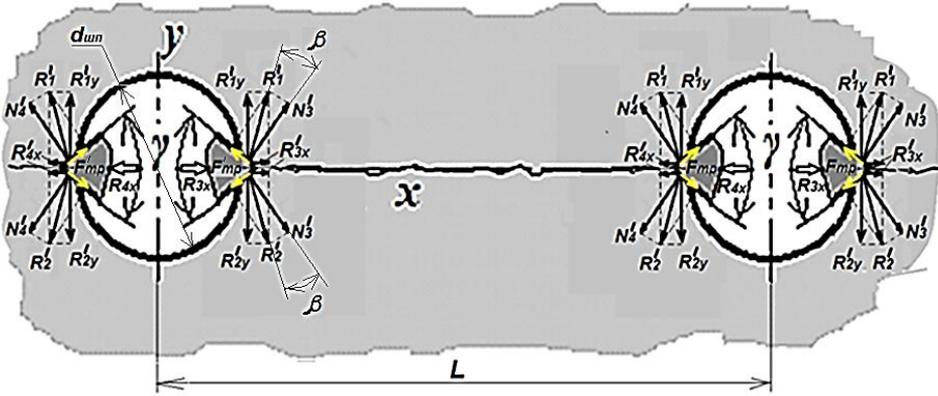


Рисунок 6 – Разложение усилий от дополнительных щек в плоскости  $x - y$

На этих поверхностях также возникают силы трения  $F_{mp}'$  щек о породу, где коэффициент трения «металл о породу»  $f'$  (таблица 2), имеющий угол трения  $\beta$ . Угол трения и здесь связан с коэффициентом трения известной формулы:

$$\operatorname{tg} \beta_{\max} = \frac{F_{mp}'}{N'} = f'.$$

Равнодействующая нормальных сил  $N_3'$  и  $N_4'$  и сил трения  $F_{mp}'$  связаны с углом трения известной зависимостью:

$$R_1' = R_2' = \frac{N_3'}{\cos \beta} = \frac{F_{mp}'}{\sin \beta}.$$

Подобно зависимости (4) величину дополнительной силы раскола  $R_{1y}'$  от действия сил  $R_{3x}$  или  $R_{4x}$  дополнительных щек для одного гидравлического клина определить как:

$$R_{1y}' = -R_{2y}' = \frac{R_{3x}}{2 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} + f'} \quad (7)$$

Подставив в (7) значение  $R_{3x}$  из зависимости (5), получим искомое усилие  $R_{1y}'$ :

$$R'_{1y} = -R'_{2y} = \frac{F_o}{4tg \frac{\alpha}{2} + f} = \frac{F_o}{\left(4tg \frac{\alpha}{2} + f\right) \cdot \left(2tg \frac{\gamma}{2} + f'\right)}. \quad (8)$$

Для окончательного определения усилия раскола  $F_{pac}$  спроецируем на ось  $y$  силы, действующие в плоскости  $(z - y)$  (рис. 5а и рис. б), при этом противоположно направленные векторы сил принимаем с положительным знаком, так как их направления способствуют процессу раскола.

Для получения направленного раскола камня при гидроклиновом способе необходимо одновременное участие при разрушении как минимум двух гидравлических клиньев. Тогда с учетом данного условия и без учета трения усилие раскола будет:

$$F_{pac} = n \cdot [R_{1y} + R'_{1y}], \quad (9)$$

где  $n$  – количество гидравлических клиньев на линии раскола.

Подставив в формулу (10) выражения (5) и (8), окончательно получим зависимость раскалывающего усилия  $F_{pac}$  от осевой силы  $F_o$ , действующей в гидроцилиндре:

$$F_{pac} = n \cdot \left[ \frac{F_o}{4tg \frac{\alpha}{2} + f} + \frac{F_o}{\left(4tg \frac{\alpha}{2} + f\right) \cdot \left(2tg \frac{\gamma}{2} + f'\right)} \right]. \quad (10)$$

После преобразований окончательно имеем:

$$F_{pac} = \frac{F_o \cdot n}{4tg \frac{\alpha}{2} + f} \cdot \left( 1 + \frac{1}{2tg \frac{\gamma}{2} + f'} \right). \quad (11)$$

В заключение можно сказать, что предлагаемый порядок определения раскалывающего усилия расклинивающего устройства новой конструкции для направленного раскола различных твердых материалов позволяет определить силовые параметры, необходимые

для проектирования и создания подобных устройств для горнодобывающей отрасли. Также стоит отметить, что действующие раскалывающие силы вызывают напряжения в плоскости раскола, на которые могут влиять формы рабочих поверхностей раздвижных щек. Исследования этих напряжений являются следующим шагом в изучении механики направленного раскола твердого материала раскалывающими устройствами.

### Литература

1. Усубалиев Ж., Эликбаев К.Т., Райымбабаев Т.О. / Обзор технологий отделения блока природного камня от массива с помощью буровых способов и невзрывчатых разрушающих средств (НРС). // Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т. О. Райымбабаев. – Машиноведение. № 2 (8). – Имаш НАН КР. – Бишкек, 2018. – С 59–70.
2. Усубалиев Ж., Эликбаев К.Т., Райымбабаев Т.О. / Обзор технологий отделения блока природного камня от массива с помощью камнерезных машин и гидравлических раскалывателей (HRS). // Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Т. О. Райымбабаев. Машиноведение, № 2 (8). – ИМА НАН КР. – Бишкек, 2018. – С. 71–82.
3. Беляев Н.М. / Соппротивление материалов. –М.: Наука, 1976. – С. 608.
4. [https://osntm.ru/kt\\_tren.html](https://osntm.ru/kt_tren.html). Дата обращения: 10.08.22.
5. Теории прочности скальных и полускальных пород. <http://tnaant.ru/inzhenernaya-geologiya/784-teorii-prochnosti-skalnyh-i-poluskalnyh-porod.html>. Дата обращения: 12.09.22.
6. [https://yandex.ru/images/search?text=модуль% 20 упругости % 20грунта&stypе](https://yandex.ru/images/search?text=модуль%20упругости%20грунта&stypе). Дата обращения: 8.09.22.
7. ГОСТ 12248 — 2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Стандартиформ, 2011.
8. [https://studme.org/327636/tehnika/raschet\\_tsilindricheskih\\_peredach\\_prochnost](https://studme.org/327636/tehnika/raschet_tsilindricheskih_peredach_prochnost). Дата обращения: 12.09.22.