

викачування зі сховищ для транспортування до Європи. Вирішення цих питань буде кінцеве при можливості інвестування й обґрунтування вибраних методик.

#### Список література

1. Подземное хранение газа. [Електродний ресурс] - Режим доступу: [https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9F%D0%BE%D0%B4%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B5\\_%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5\\_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%B0&veaction=edit&vesection=11](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9F%D0%BE%D0%B4%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%B0&veaction=edit&vesection=11) Firefox HTML\Shell\Open\Command.
2. Чернова О.Т. Аналіз розвитку мережі підземних сховищ газу України/ О.Т. Чернова // Розробка родовищ. - Д.: ДВНЗ «НГУ». 2014. С. 261-276.
3. Дудля М.А. Процеси підземного зберігання газу [Текст]: підручник / М.А. Дудля, Л.М. Ширін, Е.А. Федоренко. - Д.: Національний гірничий університет, 2012. - 412 с.
4. Савків Б.П. Підземне зберігання газу в Україні / Б.П. Савків. - К.: Кий, 2008. - 240 с.

### **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АЛМАЗНОЙ БУРОВОЙ КОРОНКИ С ЗАБОЕМ СКВАЖИНЫ И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА**

*М.Т. Аубакиров, ТОО «АККА-АЛМАС», Республика Казахстан  
Б.Т. Ратов, Б.В. Федоров, М.Т. Билецкий, Н.Н. Ахметов, НАО Казахский национальный  
исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева,  
Республика Казахстан*

Авторы выдвинули и обосновали расчетом новую модель взаимодействия алмазной буровой коронки с забоем скважины. Ее сущность заключается в том, что алмазные зерна матрицы соприкасаются с забоем по поверхности, испещренной мелкими раковинками – выщерблинками, которые образовались в результате сколов части выступающих из-под матрицы алмазных зерен, под действием осевой нагрузки. Предлагается также изготавливать коронки с меньшей площадью опорного торца матрицы, в частности рекомендовать сектора матрицы выполнять трапецевидной формы.

Одной из основных проблем, связанных с повышением технико-экономических показателей алмазного бурения, является установление закономерности работы алмазов и их состояние в матрице коронке при её работе на забое скважины.

Теоретический анализ работы алмазной коронки большинство авторов начинают с анализа работы единичного алмазного зерна, форму которого принимают в виде пирамиды, обращенной острием вниз, эллипсоида или шара. При этом за оптимальный режим работы алмазной коронки принимают тот, при котором имеет место объемное разрушение породы забоя.

Представляется, что эта точка зрения справедлива только при бурении однослойными или импрегнированными коронками, армированными крупными зернами алмазов, причем при разрушении пород, относящихся к IX и менее категориям. В случае же использования импрегнированных коронок, у которых размер алмазных зерен составляет менее 630 мкм (зернистость 250 шт\карат и более) такая точка зрения требует корректировки. Тем более, что в крепких (выше IX категории) породах наиболее широко и эффективно применяются именно импрегнированные коронки.

Рассмотрим глубину внедрения алмазного зерна в породу для типичных условий бурения однослойными и импрегнированными коронками. Используем при этом основные параметры коронок 02ИЗ и 01АЗ диаметром 59 мм.

Глубина внедрения резца  $h$  определяется по формуле [1,7]:

$$h = \frac{V}{n \cdot m}, \quad (1)$$

где  $V$  - скорость бурения, м/час;  $n$  - частота вращения коронки,  $c^{-1}$ ;  $m$  - среднее число алмазов по окружности коронки.

Проведем количественную и качественную оценку процесса разрушения смежных категорий (IX-X) по буримости при бурении однослойными и импрегнированными коронками. Механическая скорость бурения однослойными коронками по породам IX категории по буримости согласно [1] равна 5м/час, а импрегнированными коронками в породах X категории по буримости - 3м/час. (эти значения близки к максимальным)

За типичную частоту вращения с учетом максимальной примем в породах IX категории -  $500 \text{ мин}^{-1}$ , для пород X категории -  $600 \text{ мин}^{-1}$ .

Число алмазов  $m$  расположенных в одном слое по одной окружности определяем из выражения:

$$m = \frac{k \cdot t}{c \cdot r}, \quad (2)$$

где  $k$  - количество объемных алмазов в коронке, карат;  $t$  - зернистость алмазов;  $c$  - число слоев, по которым алмазы расположены в матрице;  $r$  - число алмазов, расположенных по одному радиусу коронки.

Последняя величина (рис.1) определяется по формуле с учетом того, что диаметры объемных и подрезных алмазных зерен отличаются незначительно:

$$r = \frac{R_H - R_B - d_0}{d_0}, \quad (3)$$

где  $R_H$  и  $R_B$  - соответственно наружный и внутренний радиусы коронки;  $d_0$  - диаметр объемных алмазов.

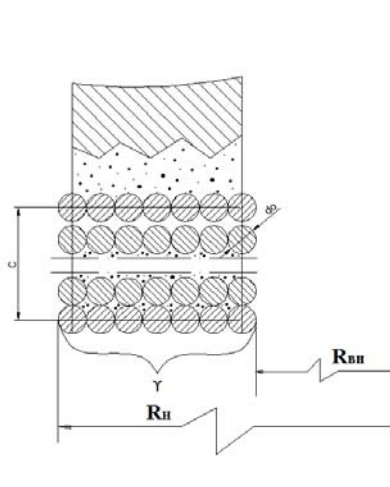


Рис. 1. К определению числа алмазов, расположенных в одном слое алмазной коронки

Для коронок 01А3  $K=3,2$  карат,  $t=75$  шт/карат (средняя цифра для указываемого в характеристиках интервала 60-90 шт/карат.)  $C=1$ ,  $R_H=29,5$  мм,  $R_B=21$ мм,  $d_0=1.8$ мм (при крупности 20-30 шт/кар) Отсюда:  $r=4.5$  шт.,  $m=53$  и  $h=0.0032$  мм.

Для коронок 02ИЗ  $K=8.8$  карат,  $t=275(150 \div 400)$ шт/карат  $R_H$ ,  $R_B$  и  $d_0$  те же, что и у коронок 01А3, а  $d_0=0.63$ мм

Остается определить величину  $C$ . В литературе [2] указывается, что количество объемных алмазов в одном условном слое импрегнированной коронки 02ИЗ равно

$$c = \frac{K}{K_c} = \frac{8,8}{1,3} \approx 6,8.$$

( $K_c$  - масса алмазов в одном слое  $K_c=1,3$  карат.)

Однако, по нашему мнению, более обоснованным число условных слоев в импрегнированной коронке следует определять, исходя из того, что одному слою принадлежат одновременно находящиеся в работе алмазы, которые при нормальном процессе разрушения начинают выпадать, когда в матрице остается половина диаметра зерна. Тогда, исходя из указанного допущения, толщина одного слоя  $d_0 / 2$  и тогда число условных слоев в рабочей части матрицы:  $C=l/l_c$ , ( $l$  - высота объемного алмазоносного слоя матрицы).

В принятом примере  $l = 4$  мм и тогда при  $l_c=0,52$  мм,  $C \approx 12,5$  слоев. Полученная цифра представляется более реальной и во всяком случае дает большую величину, чем вышеприведенная ( $C=6,8$ ). В итоге получаем, что для коронки 02ИЗ:  $r=10,6$ ;  $m=18,2$ ;  $h=0,0045$  мм (совпадение цифр случайное, но порядок значений достоверен)

Очевидно, что когда размеры внедрения одного алмазного зерна составляют порядка 4-5 мкм, то говорить об объемном разрушении пород вряд ли имеет смысл.

Установленная величина внедрения опровергает также положение о том, что взаимодействующая с забоем часть алмазного зерна может быть представлена в виде шара или эллипсоида, достигающего максимальной глубины внедрения в единственной точке. Действительно, поскольку ширина зоны разрушения от действия эллипсоида соизмерима с глубиной его внедрения в породу, то промежутки между кольцевыми зонами разрушения на забое оказываются чрезмерно большими. В частности, в работе [3] доказывается, что обычно  $v=6h$ , т.е. промежутки в 6 раз больше глубины внедрения. Тогда, приняв, что  $h$  в нашем случае равна 3,2 мкм получаем  $v=19,2$  мкм=0,0192 мм. Ширина неразрушенной зоны по радиусу коронки равна:

$$a = R_H - R_d - d_n - r \cdot b, \quad (4)$$

При принятых значениях получаем  $a=6,65$  мм, т.е. ширина неразрушенной зоны « $a$ » многократно превышает « $r \cdot b$ » и, следовательно, бурение практически не могло бы осуществиться. Этот вывод не изменяется при установке алмазов в сопряженных радиальных рядах в шахматном порядке.

Принципиально иное положение возникает, если отвергнуть гипотезу о близкой к эллипсоидной форме единичного алмазного зерна и вместо этого считать, что это зерно соприкасается с забоем по поверхности, которая представляет параллельную забою плоскость, испещренную мелкими раковинками-выщерблинами, кромки которых, взаимодействуя между собой, и производят разрушение забоя. Факт наличия таких выщерблин установлен экспериментально при рассмотрении поверхности работавшего на забое алмаза в микроскоп [3], а сам процесс их образования получил название фрагментарного износа. Что же касается предположения о том, что типичная рабочая поверхность алмаза чаще всего представляет собой обращенную к забою в целом плоскую поверхность, то это доказывается условиями работы алмаза, острые выступающие над матрицей углы которого сразу после спуска коронки на забой начинают подвергаться сколам до тех пор, пока не образуются расположенные примерно «заподлицо» с поверхностью матрицы площадки. Процесс образования таких площадок, в частности, и является причиной резко ускоренного износа алмазов в период приработки коронки [2]. Площадки обычно хорошо видны в микроскоп.

Поскольку породоразрушающие кромки расположены по всей ширине площадки работающего алмазного зерна и перекрывают друг друга, а в разрушаемой породе тоже самое происходит на уровне микроструктуры, то трудно объяснимый (как это было показано выше) факт распространения зоны разрушения по всей ширине торца коронки становится очевидным.

Так как различие в высоте выступа над уровнем матрицы между кромками, внедрившимися в забой, и теми, которые не работают, определяется долями микрона, то становится ясно, что в каждый рассматриваемый момент времени в работе находятся не все, а только часть режущих кромок алмазных зерен. Эта часть еще более уменьшается из-за отклонения формы забоя об идеально плоской вследствие наличия на ней небольших

«ухабов» и скоплений спрессованного шлама, причем при движении резцов по окружности нагрузка скачкообразно переходит с одних режущих кромок на другие. Все это приводит к сколам, в результате которых отработанные кромки заменяются новыми, более острыми. Это явление (которое и представляет собой фрагментарный износ алмазов) обеспечивает нормальный ход процесса разрушения забоя, что особенно характерно при работе синтетических поликристаллических алмазов.

В тоже время наряду с фрагментарным имеется и другой вид износа поверхности алмазных зерен - их истирание и сглаживание кромок при контакте с породой. Этот вид износа протекает тем быстрее, чем выше частота вращения коронки, а, значит, и работа сил трения в единицу времени.

Если осевая нагрузка недостаточна, то фрагментарный износ замедляется, и тогда процесс сглаживания кромок прогрессирует. Это, в свою очередь, еще больше уменьшает вероятность сколов. Во-первых, при затуплении кромок возрастает их опорная площадь, а значит, при тех же удельных нагрузках падают соответствующие напряжения. Во-вторых, уменьшаются сами удельные напряжения, что происходит из-за стачивания кромок по высоте и выравнивания их с теми, которые ранее еще не касались забоя. Поэтому осевая нагрузка перераспределяется на большее число кромок. При отсутствии сколов и обновления режущих кромок процесс износа алмазов истиранием все более прогрессирует и за короткое время приводит к падению скорости бурения до нуля. Вследствие сглаживания и выравнивания всех режущих кромок в одной плоскости рабочие площадки алмазов приобретают характерный блеск, что позволила называть описанное явление зашлифовкой матрицы коронки.

Особенно часто это явление возникает при бурении наиболее крепких и мелкозернистых пород (роговики), так как из-за их высокой твердости процесс истирания режущих кромок алмаза идет интенсивнее.

Усилению процесса зашлифовок способствует также образующийся при бурении таких пород очень мелкий шлам, что способствует его полному удалению с забоя и, соответственно, уменьшению неравномерности движения режущих кромок по поверхности забоя.

Установка над алмазной коронкой высокочастотного гидроударника увеличивает действующие на алмазы динамические нагрузки, что приводит к повышению интенсивности фрагментарного износа и уменьшению зашлифовки алмазов.

Из практики алмазного бурения известен такой прием исключения зашлифования коронки: на забой подаются мелкие кусочки твердых пород. Последние, перекатываясь по забоям при вращении коронки, в результате «выщербленную» поверхность алмазонасуемого торца.

Экспериментальными исследованиями [3] и опытом эксплуатации импрегнированных алмазных коронок отраслевой научно-исследовательской лабораторией ЭМБРС КазПТИ (ныне КазНИТУ) в производственных условиях доказано, что эти коронки способны выдерживать значительные осевые нагрузки (1600-2100 н/см<sup>2</sup> и более), обеспечивая при этом высокие контактные напряжения. Эти рекомендации не применимы, когда бурение ведется по сильно трещиноватым или абразивным крепким породам.

Повышение нагрузки на импрегнированную алмазную коронку в определенных пределах приводит к увеличению эффективности ее работы, однако максимум допустимых осевых нагрузок ограничивается как механизмом разрушения пород, так и прочностью бурильной колонны, мощностью двигателя станка и требованием ограничения интенсивности искривления скважин.

В то же время увеличение действующих на единичное алмазное зерно удельных нагрузок (а значит, и большей величины внедрения режущих кромок и интенсификация процесса их обновления) можно достичь и без увеличения суммарной осевой нагрузки на коронку в целом, а только за счет уменьшения рабочей площади ее торца.

В настоящее время алмазные коронки изготавливают многосекторными с плоским торцом и промывочными окнами. При этом площадь торцевой части секторов относится к соответствующей площади окон как 5:1. Причина такой конструкции заключается в стремлении при одной и той же площади забоя снизить удельные нагрузки на единичный

алмаз, а также увеличить длину периметра, по которому матрица крепится к короночным кольцу с целью повышения прочности инструмента.

И хотя этот довод вполне заслуживает внимания, следует стремиться к тому, чтобы при достаточной протяженности контакта матрицы с короночным кольцом площадь рабочего торца коронки была бы существенно уменьшена по сравнению с той, которая принята сейчас (например, коронки БИТ с трапециевидными секторами при плоском торце).

Многочисленными исследованиями установлено, что одно из важнейших условий алмазного бурения - это охлаждение алмазов и своевременный вынос шлама. Рассмотрим эти процессы.

В литературе при исследовании образования шлама, алмазное зерно рассматривают или как резец или как некий индентор. При этом рассматривается нормальное усилие на резец, а в некоторых работах - окружные и скалывающие усилия.

Нормальные силы, действующие на резец, заставляют его внедряться в породу. В последней возникают затухающие трещины, порода сжимается и раздавливается. Очевидно, при таком механизме вращающаяся коронка еще и перетирает образующийся шлам. Чем крепче порода, тем мельче шлам. Шлам по версии многих исследователей выносится промывочной жидкостью через специальные окна буровой коронки. В тоже время есть исследования и работы, которые показывают, что шлам выносится радиально из-под секторов коронки. Косвенным доказательством этого является наличие мельчайших частиц в буровом шлеме. Размеры разрушенных частиц в значительной мере зависят от физико-механических свойств породы, ее минералогического состава, макро- и микроструктуры. Как считают многие исследователи, разрушение породы может идти не только за счет достижения предела прочности породы на сжатие, но и за счет разрыва связи кристаллов между собой и микроструктурное разрушение пород. Под воздействием крутящего момента резец оказывает на породу режущее и скалывающее воздействие, которое суммируется с касательными напряжениями, возникающими при разложении нормальных усилий на зерно. Учитывая, что прочность пород на сдвиг на порядок меньше, чем на сжатие, именно эти напряжения, суммируясь с напряжениями от крутящего момента приводят к разрушению породы. Таким образом, следует констатировать, что воздействие алмазного зерна реализует одновременно множество механизмов разрушения: микрорезание, резание, скалывание элементарных частиц, раздавливание, слияние и даже нежелательное шлифование в зависимости от геологотехнических условий. Реализация каждого из указанных механизмов разрушения определяет как размеры и качество шлама, так и условия его выноса из-под торца коронки. Последнее является весьма важным элементом процесса алмазного бурения, так как износ матрицы коронки и обнажение алмазов происходит при контакте ее с породой и шламом. В случае накопления последнего и роста его толщины под торцом коронки наступает момент, когда резцы перестают контактировать с породой забоя, и процесс разрушения последнего и удаления шлама прекращается. В этом случае повышенный износ матрицы приводит зачастую к повышению износа алмазов из-за их перегрева.

Вопрос тепловыделения при работе любого инструмента, а тем более алмазного является одним из важных моментов его эксплуатации. Знание законов теплораспределения по алмазу и секторам коронки, температурного поля в секторе позволяет выявить не только рациональную технологию бурения, но и определить оптимальную конструктивную форму породоразрушающего элемента.

С целью выявления теплораспределения в секторе алмазной коронки осуществлялось моделирование методом электротепловой аналогии (эквипотенциальных линий) [4,5,6]. В качестве основы была применена электропроводная бумага с сажевым покрытием.

Устройство электротепловой аналогии представлено на рис. 2. Плоская модель 1, геометрически подобная сектору с неподвижным источником теплоты 2 и стоками теплоты 3-6, вырезается из электропроводной бумаги. Источник питания 7 служит для питания всей установки. Сопrotivлениями  $R_1, R_2, R_3, R_4$  регулируется изменение напряженности поля на модели, что позволяет по ней создавать распределение плотности тока «б» по закону, аналогичному закону распределения интенсивности источника тепла «q» в нагреваемом теле. Вольтметром 9 и щупом 8 определяются эквипотенциальные линии на модели.

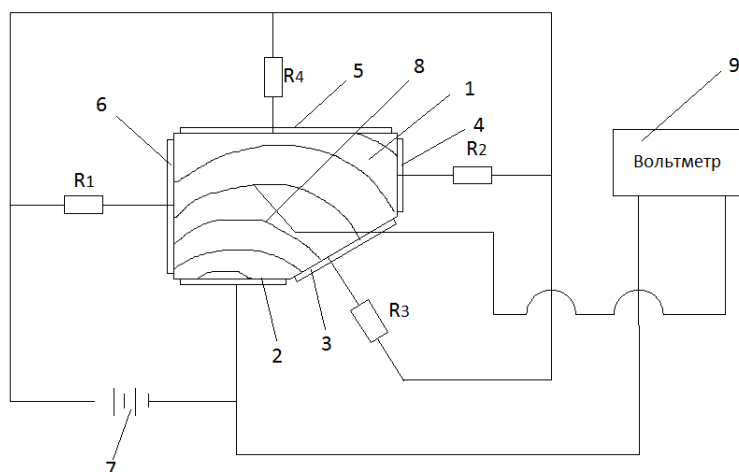


Рис. 2. Аналоговое устройство для моделирования тепловых процессов в алмазных коронках на токопроводящей бумаге

- 1 - токопроводящая бумага; 2- источник тепла; 3;4;5;6 –стоки тепла; 7 – источник питания; 8 – щуп; 9 – вольтметр В7-16

В эксперименте было определено тепловое распределение при  $R_4=R_1=R_2=R_3$ ,  $2R_4=R_1=R_2=R_3$  и  $R_{4/2}=R_1=R_2=R_3$

Изменение сопротивления  $R_4$  в модели аналогично регулированию интенсивности теплоотвода с поверхностей сектора. Тепловое распределение представлено на рисунке 3. Сравнивались распределения температур в двух секторах разной формы: обычной «чемоданной» (тип А) и «трапециевидной» (тип Б).

Анализ  $q$  полей температур (рис. 3) позволяет сделать следующие выводы:

- интенсивность теплоотвода, в секторах с трапециевидной матрицей значительно выше, чем в секторах с матрицей «чемоданного» типа;
- сток тепла в промывочную систему выше, чем теплопередача в тело коронки;
- пики в задней части трапецеидального сектора свидетельствует о значительном влиянии процесса теплопередачи в тело коронки в теплообмене «сектор - промывочная жидкость - тело коронки».

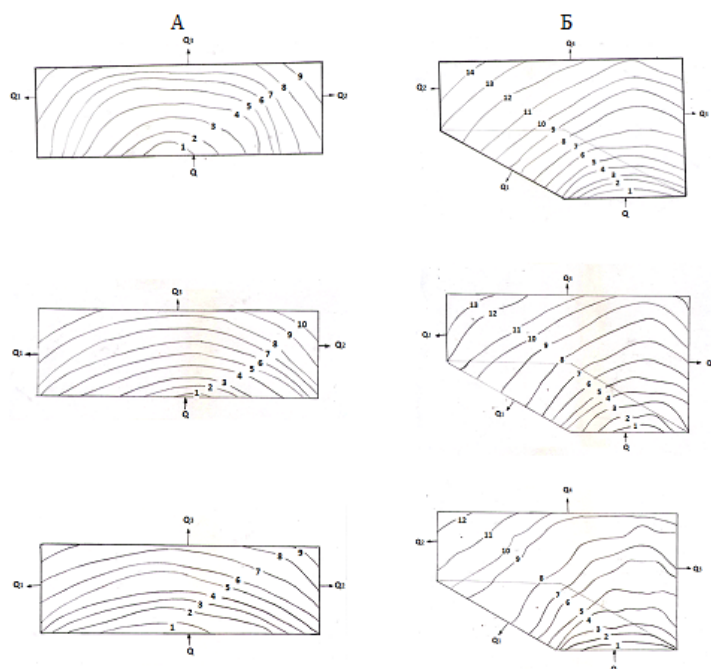


Рис. 3. Распределение температур в секторах алмазной коронки при экспериментальном исследовании методом электросилового аналогии

А – «чемоданный» тип профиля; Б – «трапецеидальный» тип профиля.

На основе проведенных исследований были разработаны несколько конструкций алмазных буровых коронок, обеспечивающих хорошее охлаждение алмазов и вынос шлама. Одним из них является алмазная буровая коронка типа БИТ, серийно выпускаемая Кабардино - Балкарским заводом алмазного инструмента. В нем реализована возможности высокой удельной нагрузки на алмаз по сравнению с коронками, с секторами чемоданного типа.

**Выводы.** Анализ фракционного состава образующегося шлама дает основание полагать, что при алмазном бурении забоя реализуется множество механизмов разрушения: микрорезание, резание, микросплавление, раздавливание и даже нежелательное шлифование. В случае недостаточной промывки толщина невынесенного из-под торца коронки шлама растет, алмазные зерна перестают контактировать с забоем, который перестает разрушаться. Невынесенный шлам вызывает повышенный износ алмазов, их перегрев и прижиг коронки. Влиянию формы алмазосодержащих секторов матрицы на распределение температуры в алмазной коронке исследовался моделированием методом электротепловой аналогии (эквипотенциальных линий). В качестве основы применялась электропроводная бумага с сажевым покрытием. В результате установлена, что трапециевидная форма алмазосодержащих секторов обеспечивает значительно большую теплоотвод с рабочего торца коронки, чем обычный, так называемый «чемоданный» тип секторов. Механизм разрушения – не однозначный процесс, зависящий как от конструкции алмазной буровой коронки, так и в значительной мере от физико-механических свойств разрушаемой породы. Знание теплофизических законов процесса бурения имеет важное значение при разработке режимов бурения алмазными коронками. Необходимо выводить алмазосодержащий слой из высоко температурной зоны, или, по крайней мере, защитить от теплового воздействие не работающие в данный момент алмазы.

#### Список литературы

1. Гразов М.Г. «Алмазосберегающая, технология бурения» Разведка и охрана недр 1983, №4.
2. Марамзин А.В., Блинов Г.А., Галиопа А. - Технические средства для алмазного бурения. - Л.: Недра, 1982.
3. Исаев М.И., Понамарев П.В. Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин. - М.: Недра, 1975.
4. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов М., Машиностроение, 1981.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - С.: Энергиздат, 1981.
6. Аубакиров М.Т. В механизме разрушения крепких горных пород алмазными буровыми инструментами / М.Т. Аубакиров, Б.Т.Ратов, Б.В.Федоров // Инновационные технологии и проекты в горно-металлургическом комплексе, их научное и кадровое сопровождение: материалы междунар. научно-практ. конф., 18-19 марта, 2014 г., г. Алматы. – А.: КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2014. С. 323-327.

## **АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГОРНУЮ ПОРОДУ ПРИ БУРЕНИИ АЛМАЗНЫМИ КОРОНКАМИ**

*А.А. Кожевников, Национальный горный университет, Украина*

*Ю.Н. Вахалин, О.В. Ливак, Украинский государственный химико-технологический университет, Украина*

*А.Ю. Дреус, Днепрпетровский национальный университет им.О.Гончара, Украина*

В работе обоснована методика исследования и представлены результаты расчета параметров разрушения горной породы при переменном термическом воздействии инструмента и охлаждающей жидкости. Показано, что возникающие при работе буровой коронки знакопеременные термомеханические напряжения способствуют, при определенных