

УДК 622.236.3:622.235.57;536.4

**Ганкевич В.Ф.**, канд. техн. наук, доцент  
(ГВУЗ «НГУ»)

**Кравец В.И.**, канд. техн. наук, доцент,

**Ливак О.В.**, магистр  
(ГВУЗ «УГХТУ»)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ  
ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ТРЕНИИ ПЛОСКОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ  
ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОГО ОСЛАБЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

**Ганкевич В.Ф.**, канд. техн. наук, доцент  
(ДВУЗ «НГУ»)

**Кравец В.И.**, канд. техн. наук, доцент,

**Ливак О.В.**, магистр  
(ДВУЗ «УГХТУ»)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ НА ПОВЕРХНІ ГІРНИЧОЇ  
ПОРОДИ ПІД ЧАС ТЕРТЯ ПЛОСКОГО ЕЛЕМЕНТУ ДЛЯ  
ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО ОСЛАБЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ**

**Gankevich V.F.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor  
(SHEI «NMU»)

**Kravets V.I.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor,

**Livak O.V.**, M.S (Tech.)  
(SHEI «USUCHT»)

**RESEARCH OF THE TEMPERATURE FIELDS ON SURFACE OF MINE  
BREED AT FRICTION OF FLAT ELEMENT FOR  
THERMO-CYCLICAL WEAKENING OF SUPERFICIAL LAYER**

**Аннотация.** В статье рассмотрена задача нагрева поверхности полупространства горной породы в зоне контакта при движении по ней плоского нагруженного штампа для подготовки к термоциклическому разрушению. Получены аналитические зависимости температуры нагрева горной породы от нагрузок на штамп и скорости его скольжения. Проведенное сравнение аналитических зависимостей получаемых температур с экспериментальными данными показывает, что с уменьшением интенсивности промывки скважин значения расчетных температур приближаются к экспериментальным, так как расчетная зависимость не предусматривает какого-либо охлаждения как полупространства, так и штампа. Полученные зависимости позволяют рассчитывать любые элементы трения о забой и стенки скважины при проектировании технологических процессов и рабочих органов, реализующих в скважинах термоциклическое растрескивание и разупрочнение породы (вплоть до плавления) с предварительным нагревом породы трением.

**Ключевые слова:** горная порода, термическое разрушение, бурение, трение

Резкое охлаждение породы, нагретой до высоких температур, приводит к развитию мощных растягивающих напряжений на охлаждающей поверхности и, как следствие, растрескиванию породы.

Для реализации термоциклического разрушения необходимо поверхность породы сначала каким-то образом нагреть до высоких температур, а затем резко охладить.

Способов нагрева горной породы существует достаточно много: горячей газовой струёй, струёй перегретого пара, электронагревом, плазменной струёй, трением и т.д. [Дмитриев А.П., 1978]. Все эти способы в той или иной мере прошли испытания на горных породах. В стеснённых условиях скважин и при наличии больших глубин бурения или обработки полученных полостей практическая реализация большинства способов предварительного нагрева является очень сложной технической задачей. В то же время, при бурении любой скважины имеет место вращение инструмента и буровых труб, а также механические нагрузки. Эти два фактора (вращение и нагрузки) являются достаточными для организации в полости скважины, как на забое, так и на стенках эффективного нагрева заданных участков породы трением. Пример алмазного бурения показывает, что при определённых условиях может легко наступить режим бурения вызывающий плавление буримой породы и торца коронки в зоне контакта (режим “прижога” коронки). В реальных условиях проходки скважины такой режим работы является неприемлемым и его стараются избегать.

Элементы трения могут встраиваться как непосредственно в буровой инструмент, если речь идет о повышении эффективности бурения, так и в буровые штанги, если в ходе бурения необходимо создавать вокруг скважины развитую систему трещин.

Задача резкого охлаждения породы в скважине решается значительно проще, чем задача нагрева. Большинство процессов бурения сопровождается промывкой скважины водой или буровыми растворами, которые являются очень эффективными хладагентами. Интенсивность теплосъёма с нагретого участка породы определяется, в основном, скоростью движения жидкости вдоль разогретого участка породы и временем контакта пары порода - хладагент.

Для проектирования эффективных элементов трения необходимо иметь решение задачи о температуре на поверхности породы при трении об неё элемента заданной формы.

Величина нагрева породы при трении плоским штампом определяется плотностью теплового потока, поступающего в породу и временем воздействия потока на массив. Плотность теплового потока определяется зависимостью:

$$q = P_0 \cdot f \cdot V \cdot \eta, \quad (1)$$

где  $P_0$  - удельное давление на поверхности трения;  $f$  - коэффициент трения штампа о породу;  $V$  - скорость перемещения штампа вдоль породы;  $\eta$  - к.п.д. преобразования механической работы по перемещению штампа в тепло (например, при трении матрицы алмазной коронки о забой  $\eta = 0,97-0,98$ ).

Для выяснения природы и характера нагрева поверхности забоя при движении штампа по забою воспользуемся подходом, приведенным в работе [Джонсон К., 1989]. При скольжении сектора по породе в зоне контакта генерируется тепло в виде удельного теплового потока  $q$ . Необходимо найти температуру в полупространстве от теплового источника, движущегося по поверхности. Если рассматривается стационарный процесс, то удобно зафиксировать тепловой источник и считать полупространство движущимся со скоростью  $V$  параллельно оси  $x$ . При этом, температурное поле становится функцией положения, а не времени.

Рассмотрим плоскую задачу об источнике тепла при движении штампа длиной  $l_c$  по поверхности полупространства (рис. 1).

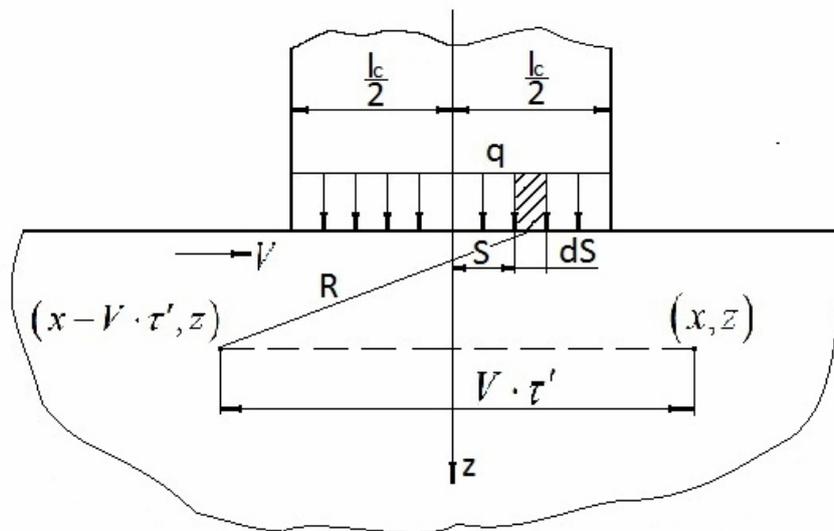


Рисунок 1 - Схема к расчету температурного поля в полупространстве при нагреве движущимся штампом с удельной интенсивностью  $q$

Распределённый источник в зоне контакта будем рассматривать как набор источников интенсивностью  $q$ , действующих вдоль прямой.

Элемент материала в точке  $(x, z)$  в момент  $\tau$  был расположен в точке  $(x - V \cdot \tau, z)$ , в предыдущий момент  $\tau - \tau'$ . Тепло, выделяемое источником в точке  $S$  за время  $d\tau'$  составляет  $q \cdot ds \cdot d\tau'$ . Распределение температуры на расстоянии  $R$  от линейного теплового нагревателя при мгновенном приложении к границе полупространства распределенных вдоль прямой источников нагрева интенсивностью  $H$ , определяется уравнением [Джонсон К., 1989].

$$T - T_0 = \left( \frac{H}{2\pi\lambda\tau} \right) \exp\left( -\frac{R^2}{4a\tau} \right), \quad (2)$$

где  $T_0$  - начальная температура полупространства;  $H$  - количество тепла, выделяющееся на единицу длины;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала полупространства;  $\tau$  - время воздействия источника тепла;  $R$  -

радиальная координата точки полупространства;  $a$  - коэффициент температуропроводности материала полупространства.

Стационарная температура элемента расположенного в данный момент в точке  $x$  (рис.1) находится интегрированием уравнения (2) от  $\tau = -\infty$  до текущего  $\tau = 0$

$$\Theta(x, z) - \Theta_0 = \frac{q}{2\pi\lambda} \int_{-\frac{l_c}{2}}^{\frac{l_c}{2}} dS \int_{-\infty}^0 \left[ \exp \left\{ -\frac{(x - S - V\tau')^2 + z^2}{4a\tau'} \right\} \frac{d\tau'}{d\tau} \right], \quad (3)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности полупространства;  $a$  - коэффициент температуропроводности полупространства.

Максимальная температура имеет место на поверхности  $z = 0$  и может быть согласно (3) записана в форме

$$\Theta(x, z) - \Theta_0 = \frac{q \cdot \frac{l_c}{2}}{\lambda \cdot L^{1/2}} \cdot F(L, X), \quad (4)$$

$$\text{где } L = \frac{V \cdot l_c}{4 \cdot a} \text{ и } X = \frac{V \cdot x}{2 \cdot a}$$

Интегралы (3) были вычислены [Карслоу Г., Егер Д., 1964]. Параметр  $L$ , известный как число Пекле, интерпретируется как отношение скорости поверхности к скорости диффузии тепла в тело. При больших числах Пекле ( $L > 5$ ) тепло диффундирует лишь на небольшое расстояние в тело за время, которое требуется поверхности для прохождения через нагретую зону. Поток тепла почти перпендикулярен поверхности во всех точках. Температура точки поверхности определится выражением:

$$T - T_0 = \frac{2q(a\tau)^{1/2}}{\pi^{1/2}\lambda} = \frac{ql_c}{2\lambda} \left\{ \frac{2}{\pi} \left( \frac{4a}{Vl_c} \right) (1+x) \right\}, \quad -\frac{l_c}{2} \leq x \leq \frac{l_c}{2}, \quad (5)$$

Средняя температура на поверхности для рассматриваемого источника определяется выражением

$$T_{cp} - T_0 \approx \frac{2ql_c}{3\pi^{1/2}\lambda} \cdot L^{-1/2} \quad (6)$$

Уравнение (5) базируется на представлении об одномерном потоке тепла в тело, оно приложимо к случаям равномерного распределения источников в любой плоской области. Средняя температура для распределения источников по области квадрата со стороной  $l$ , также дается формулой (6). А учитывая то, что при трении штампа о породу эффективная глубина проникновения тепла в массив происходит очень медленно, можно считать приведенные зависимости

справедливыми не только для квадрата, а и для любой формы поперечного сечения.

Зависимость (5) позволяет рассчитать изменение температуры по площадке нагрева во времени. Она дает возможность определять температуру породы в набегающей части штампа и сбегающей.

Для подтверждения возможности использования зависимости (5) в технических расчетах был проведен сравнительный анализ величины нагрева породы под штампом алмазной коронки, полученной экспериментально в работе [Кожевников А.А., 1985] и рассчитанной по полученным зависимостям.

При различных режимах проходки алмазными коронками марки О2И4 с диаметрами 76 и 93 мм, методом срезаемых термопар, встроенных в гранит были экспериментально измерены температуры поверхности забоя в процессе бурения. Для этих же режимов была рассчитана температура поверхности гранита в сбегающей части штампа (сектора) по зависимости (5).

Для расчета были приняты следующие характеристики гранита:

$\lambda = 2,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$  - коэффициент теплопроводности;

$a = 0,83 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  - коэффициент температуропроводности.

Характеристики штампов (секторов/) и коронок в целом:

$l_c = 27 \text{ мм}$  - длина штампа по средней линии для коронки диаметром 76 мм;

$l_c = 34 \text{ мм}$  - длина штампа по средней линии для коронки диаметром 93 мм;

$D_{вн} = 59 \text{ мм}$  - внутренний диаметр для коронки 76 мм;

$D_{вн} = 76 \text{ мм}$  - внутренний диаметр для коронки 93 мм;

$D_{ср} = 67,5 \text{ мм}$  - средний диаметр для коронки 76 мм;

$D_{ср} = 84,5 \text{ мм}$  - средний диаметр для коронки 93 мм;

$n = 6$  - количество секторов (штампов) в коронках, столько же промывочных окон;

$l_{н.о.} = 8 \text{ мм}$  - длина промывочного окна.

Удельный тепловой поток, поступающий в породу от коронки при условии, что вся работа трения преобразуется в тепло, определялась по зависимости [Шамшев Ф.А., 1983]:

$$q = \frac{N}{S}, \quad (7)$$

где  $N = 10^{-4} \cdot P \cdot n \cdot D_{ср}$ , (8)

$S$  - площадь контакта секторов коронки,  $\text{м}^2$ ;  $P$  - осевое усилие на коронку, даН;  $n$  - частота вращения коронки,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $D_{ср}$  - средний диаметр коронки, м.

Результаты экспериментальных измерений температур в породе при бурении алмазной коронкой и рассчитанные по зависимости (5) приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Экспериментальные и расчетные значения температур на забое при работе алмазных коронок.

Диаметр коронки, мм	Осевая нагрузка, даН	Частота вращения, об/мин	Расход очистного агента, л/мин	Температура, К		Абсолютное отклонение (модуль), К	Относительное отклонение (модуль), %
				Эксперимент	По зависимости (5)		
76	1000	470	10	1173	1100	73	6,6
			20	993		107	9,7
			70	743		357	32,0
76	1500	470	10	1283	1266	17	1,3
			20	1238		28	2,2
			30	1043		223	17,6
76	2000	470	10	1328	1598	270	16,8
			20	1263		335	20,9
			30	1073		525	32,8
76	1500	277	20	1093	970	123	12,6
93	1500	470	15	1253	1370	117	8,5
			25	1163		207	15,1
			70	993		377	27,5

Зависимость (5) позволяет определять температуру в зоне контакта при условии, что трущиеся поверхности – гладкие, и нет разрушения полупространства при скольжении штампа.

В рассмотренных нами реальных случаях бурения алмазными коронками условия несколько иные:

- а) имеет место разрушение тонкого поверхностного слоя буримой породы;
- б) буримая порода и штамп (матрица коронки) имеют определенную шероховатость.

Рассмотрим, могут ли эти два фактора влиять каким-то образом на температурный режим в зоне контакта матрицы коронки с забоем.

По первому фактору. Упрощенно процесс бурения алмазными коронками представляется в виде скалывания мелких частиц породы единичными алмазами и образования одновременно зоны предразрушения трещинами, уходящими вглубь массива.

Установлено, что в вершине растущей в твердом теле трещины развиваются очень высокие локальные температуры. Например, для кварца (одного из основных породообразующих минералов) температура в вершине растущей трещины может достигать 4500 К [1]. Другой вопрос, что зона, в которой такая температура вспыхивает при движении трещины, очень мала, и занимает область порядка  $2 \cdot 10^{-12}$  см<sup>3</sup>. Учитывая, что бурение алмазными коронками

является очень мелкофракционным, а плотность трещин предразрушения достаточно высока, следует ожидать существенных температур в разрушаемом объеме. В работе [1] дается оценка нагрева разрушаемого слоя породы только от самого фактора развития трещин в 295 - 926 К. Теплота от процесса разрушения формируется в глубине тонкого разрушаемого слоя и в процессе бурения температурный фронт движется впереди забоя, несколько опережая непосредственно зону контакта. Срезаемая термopара, очевидно, фиксировала эту температуру непосредственно перед моментом срезания.

Второй фактор - шероховатость взаимодействующих поверхностей. Известно, что малые начальные отклонения от идеального соответствия поверхностей приводят к концентрации давления и, следовательно, к фрикционному тепловыделению на отдельных участках поверхности контакта. Эти участки располагаются выше уровня окружающей поверхности и уменьшают область действительного контакта, поэтому локальная температура повышается ещё больше. Этот процесс назван “термоупругой неустойчивостью” [Джонсон К., 1989]. Если проскальзывание продолжается, то поднятые участки, где концентрируется давление, будут понижаться вследствие износа, пока контакт не наступит повсюду. Новые контактные участки начинают нагреваться, расширяются и воспринимают нагрузку, цикл повторяется. Этот циклический процесс часто наблюдается в контакте скольжения прилегающих поверхностей. Масштаб нагретых участков велик по сравнению с масштабом поверхностных шероховатостей и время описанного цикла в целом велико по сравнению с временем взаимодействия шероховатостей. В [2] дана оценка наиболее вероятных мест температурных микровспышек и определена их величина при трении матрицы алмазной коронки о забой. При алмазном бурении температурные флуктуации возникают, в основном, на зернах алмазов и оцениваются в 400 - 3650°C, в очень малой области поверхности самого алмаза. Линейный размер зоны на поверхности алмазного зерна, в которой наблюдается всплеск температуры, составляет  $\approx 5 \cdot 10^{-5}$  м. Следует отметить, что вспышки эти имеют хаотический характер и оказывают больше влияния на износ алмазов, чем на общую тепловую картину в зоне контакта матрицы с забоем. Очевидно, что эти два фактора, в целом, оказывают влияние на температурный режим бурения в зоне контакта, и они фиксировались срезаемой термopарой в процессе экспериментов, однако можно считать, что для приближенных расчетов тепловыделения в зоне трения штамп - порода можно пользоваться зависимостью (5).

Сравнение экспериментальных и расчетных результатов по таблице показывает, что с уменьшением интенсивности промывки скважин значения расчетных температур приближается к экспериментальным значениям. И это – не удивительно, так как расчетная зависимость (5) не предусматривает какого-либо охлаждения, как полупространства, так и штампа.

Следует отметить, что полученная зависимость (5) справедлива для малых времен взаимодействия штампа и породы (доли секунды - секунды), так как она

не учитывает вероятность нагрева самого штампа. Однако она даёт возможность надёжно определить момент времени, когда в зоне контакта пары: штамп - порода, наступает критическое состояние (плавление породы или материала штампа).

Таким образом, полученные зависимости позволяют нам рассчитывать любые элементы трения о забой и стенки скважины при проектировании технологических процессов и рабочих органов, реализующих в скважинах термоциклическое растрескивание и разупрочнение породы (вплоть до плавления) с предварительным нагревом породы трением.

---

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кожевников, А.А. Теплота трещинообразования при алмазном бурении. / А.А. Кожевников, Ю.Н. Вахалин // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників-2011» 13-16 жовтня 2011. – Днепропетровск: НГУ, 2011. – С. 72-75.

2. Анализ термического воздействия на горную породу при бурении алмазными коронками. / А.А. Кожевников, Ю.Н. Вахалин, А.Ю. Дреус, О.В. Ливак // Форум гірників. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. 30 вересня - 03 жовтня 2015. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – С. 21-25.

#### REFERENCES

1. Kozhevnikov, A.A. and Vakhalin, Yu. N. (2011), «Heat of crack formation in diamond drilling», *Materialy Mizhnarodnoi konferentsii «Forum Girnykiv-2011» 13-16 zhovtnya 2011*. [Materials of the International Conference "Forum Girnikiv-2011" 13-16 October 2011], Dnepropetrovsk, UA, pp. 72-75.

2. Kozhevnikov, AA, Vakhalin, Yu.N., Dreus, A.Yu. and Livak, O. V. (2015), [Analysis of the thermal impact on rock during drilling with diamond crowns], *Materialy Mizhnarodnoi konferentsii «Forum Girnykiv-2015» 30 sentyabrya – 3 oktyabrya 2015*. [Materials of the International Conference "Forum Girnikiv-2015" 30 september - -03 October 2015], Dnepropetrovsk, UA, pp. 21-25.

---

#### Об авторах

**Ганкевич Валентин Феодосиевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горных машин, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепр, Украина,

**Кравец Василий Иванович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной механики, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет» (ГБУЗ «УГХТУ»), Днепр, Украина,

**Ливак Оксана Викторовна**, магистр, ассистент кафедры прикладной механики, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет» (ГБУЗ «УГХТУ»), Днепр, Украина, Roxiki@i.ua.

#### About the authors

**Gankevich Valentin Feodosiyevich**, Candidate of Technicsl Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Assocate Professor in the Department of Mine Machines of the State Higher Educational Institution «National Mining Univercity» (SHEI «NMU»), Dnepr, Ukraine,

**Kravets Vasily Ivanovich**, Candidate of Technicsl Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Mechanics of the State Higher Educational Institution «Ukrainian State Univercity of Chemical Technology» (SHEI «USUChT»), Dnepr, Ukraine,

**Livak Oksana Viktorovna**, Master of Science, Assistant of the Department of Applied Mechanics of the State Higher Educational Institution «Ukrainian State Univercity of Chemical Technology» (SHEI «USUChT»), Dnepr, Ukraine, Roxiki@i.ua.

---

**Анотація.** У статті розглянуто задачу нагрівання поверхні півпростору гірської породи в зоні контакту, коли по ній рухається плоский навантажений штамп, для підготовки до термоциклічного руйнування. Отримано аналітичні залежності температури нагрівання гірської породи від навантажень на штамп і швидкості його ковзання. Проведене порівняння аналітичних залежностей одержуваних температур з експериментальними даними показує,

що із зменшенням інтенсивності промивання свердловин значення розрахункових температур наближаються до експериментальних, оскільки розрахункова залежність не передбачає якого-небудь охолодження як напівпростору, так і штампу. Одержані залежності дозволяють розраховувати будь-які елементи тертя об забій і стінки свердловини при проектуванні технологічних процесів і робочих органів, що реалізують у свердловинах термоциклічне розтріскування і розуміцнювання породи (аж до плавлення) з попереднім нагріванням породи тертям.

**Ключові слова:** гірська порода, термічне руйнування, буріння, тертя

**Annotation.** Problem of rock half-space surface heating in the contact area when a flat loaded stamp moves along it for preparing for the thermal cyclic destruction is considered. Analytical dependencies between the rock heating and stamp loading and its sliding velocity are obtained. Comparison of analytical dependences of the obtained temperatures with experimental data shows an appropriate correlation between them in case of decreased intensity of bore washing. This happens because the calculated dependence does not ensure any cooling of both the half-space and the die. The obtained dependencies allow calculating any elements of friction against the borehole bottom and walls while designing technological processes and working parts for thermal-cyclical cracking and disintegration of rocks in the boreholes with rock preheating by friction.

**Keywords:** rock, thermal destruction, drilling, friction

*Стаття поступила в редакцію 22.08.2017*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Л.М. Васильевым*