

Анализ данных табл. 1 показывает, что меньшие значения отношения диаметра бурильных труб к диаметру рабочей камеры и коэффициента соединения обеспечивают ускоренный рост амплитуды гидродинамического давления в рабочей камере и, как следствие, обеспечивать рациональную гидродинамическую нагрузку на породоразрушающий инструмент.

Литература

1. Тарко Л.М. Волновые процессы в трубопроводах гидромеханизмов. – М.: Машгиз, 1963. – 162 с.
2. Пат. України № 200003266505 Гідродінамічний вібробур. 11.05.2000. Бюл. № 3 О.М.Давиденко, В.С.Сліпенький, Ю.Д.Безсоноль, В.Ф.Сірик.
3. Сліпенький В.С. Визначення енергетичних характеристик гідродінамічного вібробура. Нафтова і газова промисловість. – 2002. – № 6 – 22 с.
4. Справочник инженера побурению геологоразведочных скважин: В 2 т., Под ред. проф. Е.А.Козловского.– М.: Недра. 1984. – Том 1. – 512 с.
5. Палашкин Е.А. Справочник механика по глубокому бурению. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра. 1981. – 510 с.

Поступила 16.06.09

УДК 622.243:536.24

А. А. Кожевников¹, д-р. техн. наук, **А. Ю. Дреус**², канд. техн. наук,
С. В. Гошовский³, д-р. техн. наук, **И. И. Мартыненко**⁴, канд. техн. наук

¹ *Национальный горный университет, г. Днепрпетровск, Украина*

² *Днепропетровский национальный университет, Украина*

³ *Украинский государственный геологоразведочный институт, г. Киев*

⁴ *Государственная геологическая служба, г. Киев, Украина*

ТЕРМОДИНАМИКА СИСТЕМЫ «ИНСТРУМЕНТ–ГОРНАЯ ПОРОДА» ПРИ ГЕНЕРИРОВАНИИ ТЕПЛОТЫ ТРЕНИЯ НА КОНТАКТЕ

The results of experimental investigation of the thermal conditions of drilling instrument are presenting. The experiments are carried out with thermalvision camera.

Введение

Ресурсосберегающие режимы работы технологического инструмента (бурового, сверлильного, металлообрабатывающего и др.) во многом определяются теплофизическими процессами, протекающими в зоне контакта инструмента с рабочей поверхностью. Роль температуры в обеспечении рациональных режимов работы такого инструмента детально проанализирована в [1]. Следует отметить, что единого представления о термодинамическом состоянии на забое и температуре при генерировании теплоты трения не существует. В этой связи с этим возникают трудности при определении контактных температур с помощью расчетных методик. Неопределенность некоего важного параметра теплообмена, как коэффициент теплоотдачи, требует дополнительных исследований, в том числе с использованием методов экспериментального моделирования и новейших измерительных методик.

Постановка проблемы. Механическая энергия породоразрушающего инструмента, реализуемая на рабочей поверхности, расходуется на полезную работу разрушения и теплообразование вследствие трения. По оценкам разных исследователей [1] доля механической энергии инструмента, переходящей в тепловую, не превышает 98%. Тепловые потоки, которые генерируются на контакте, распределяются между горной породой и инструментом в соответствии с теплофизическими характеристиками последних. Вопрос распределения принципиально важен [2]. Поскольку теплопроводность инструмента в 2 раза выше, чем горной породы, основная генерируемая теплота будет направлена именно в инструмент, что приведет к его повышенному износу. Для предотвращения перегрева инструмента и поддержания нормальных условий работы необходимо обеспечить теплоотвод с боковой поверхности инструмента, которая омывается холодным теплоносителем (промывочной жидкостью, воздухом, буровым раствором и др.). Эта задача связана с необходимостью определения параметров процесса теплообмена: контактной температуры, коэффициента теплоотдачи, тепловых потоков, коэффициента распределения теплоты и др.

Подготовка и проведение экспериментов по измерению температуры довольно трудоемки и требуют значительных затрат времени и материальных. Трудности связаны так же с точностью и надежностью методик измерений, установлением датчиков и их защитой от внешних механических и электромагнитных воздействий, высокой стоимостью необходимого оборудования (в том числе алмазных коронок). Таким образом, выполнить измерения непосредственно в условиях бурения скважины чаще всего не возможно. Большинство опытов по измерению температуры породоразрушающего инструмента при его работе выполнены в стендовых условиях [1]. При этом одним из эффективных подходов к исследованию термодинамики бурения является имитация технологического процесса с использованием моделей породоразрушающего инструмента [4]. Однако и в этом случае постановка эксперимента требует тщательной подготовки и не позволяет получить целостную картину о термодинамическом состоянии, только данные о температуре в отдельных точках.

Одним из современных измерительных высокоточных устройств, который позволяет получить полную картину о тепловом режиме тела, находящегося в поле визуального контакта, является инфракрасная камера – тепловизор. Принцип действия тепловизора основан на восприятии через оптическую систему чувствительным элементом камеры (матрицей детекторов) теплового излучения от исследуемого объекта. Далее полученный видеосигнал посредством электронного блока измерения, регистрации и математической обработки оцифровывается и отображается на экране компьютера или на дисплее тепловизора.

Цель настоящей работы – исследовать теплофизические процессы, в системе «горная порода – инструмент», полученные с использованием инфракрасной камеры.

Описание экспериментальных исследований.

Для экспериментальных исследований использовали тепловизионную инфракрасную камеру AGEMA 570 производства компании FLIR Systems, прошедшую метрологическую сертификацию. Стандартный диапазон измерения для этой камеры – $-20 - +550$ °С. Чувствительность камеры – $0,1$ °С при точности измерения ± 2 % диапазона.

Серию экспериментов по имитации процесса бурения проводили с использованием сверлильного станка. Породоразрушающий инструмент моделировали с помощью полого стержня (цилиндра) из титанового сплава. Коэффициент теплопроводности материала соответствует теплопроводности конструкционных сталей. Внешний и внутренний диаметры стержня соответственно – 12 и 9 мм. В качестве горной породы использовали цилиндрический образец гранита диаметром 58 мм. Стержень закрепили в сверлильном станке и при вращении осуществляли его трение по поверхности закрепленного на весах образца горной породы.

Осевую нагрузку P (даН) фиксировали предварительно тарированными электронными весами, частоту вращения n (об./мин) – тахометром. Погрешность измерения нагрузки составляла 2,5 – 5 %, частоты вращения – 1 %.

Через определённые промежутки фиксировали температурное состояние инструмента и горной породы с помощью тепловизионной съемки. После экспериментов полученные термограммы обрабатывали на компьютере.

Результаты. Термограммы, полученные в результате тепловизионной съемки при трении стержня о гранит и соответствующие моментам, когда температура стержня достигла установившегося режима, показаны на рис. 1.

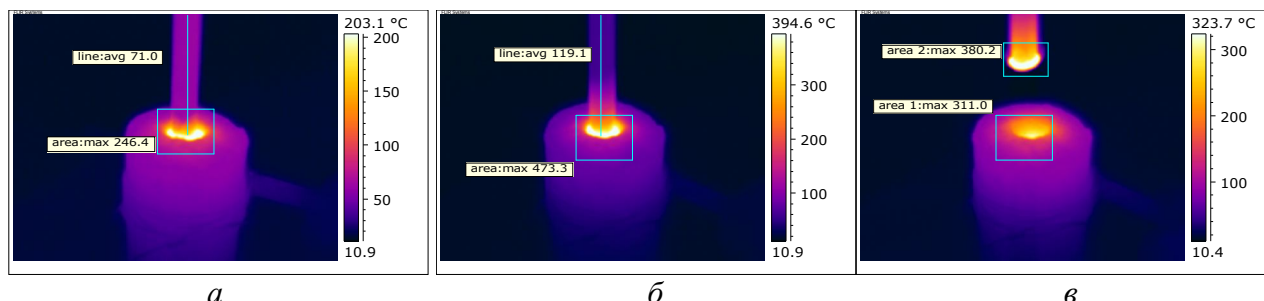


Рис 1. Термограммы полученные через определенное время после начала процесса: а – через 80 с ($P = 20$ даН, $n = 750$ об./мин); б – через 90 с ($P = 40$ даН, $n = 750$ об./мин); в – через 120 с ($P = 40$ даН, $n = 750$ об./мин)

Результаты экспериментов свидетельствуют, что область высоких температур локализована на рабочей поверхности. Далее температура снижается по экспоненциальной зависимости. Теплосъем обеспечивается за счет вращения инструмента, в результате чего получают необходимые коэффициенты теплообмена и контакт с холодным окружающим воздухом.

Увеличение осевой нагрузки в два раза (рис. 1 а, б) приводит к увеличению средней по высоте контактной температуры стержня менее чем в два раза.

Термограмма, показанная на рис. 1в, соответствует моменту отрыва инструмента от поверхности породы и позволяет оценить степень прогревания горной породы. Несмотря на низкую теплопроводность гранита, температура на периферии рабочей поверхности породы достигает 85°C .

Графики изменения температуры, изображенные на рис. 2, получены в результате обработки термограмм. Они подтверждают экспоненциальный характер изменения температуры по высоте инструмента. При этом для более высокой нагрузки область прогревания (где наблюдаются высокие градиенты температуры) расширена.

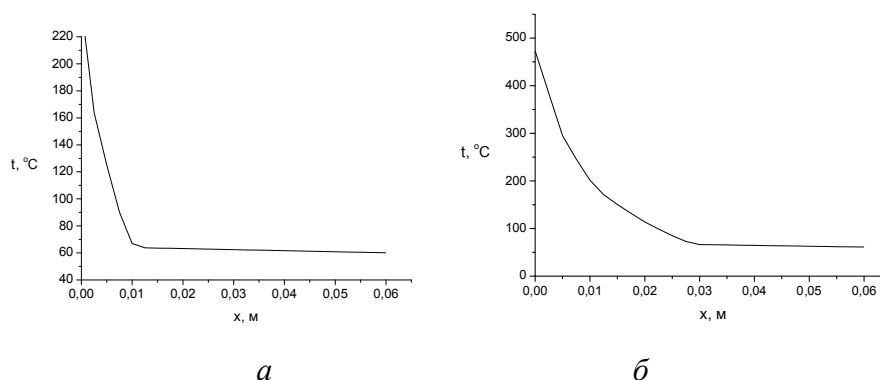


Рис 2. Графики изменения температуры по высоте инструмента: а – $P = 20$ даН; $n = 750$ об./мин; б – $P = 40$ даН; $n = 750$ об./мин

Определение теплоотдачи инструмента. Одной из основных проблем при расчете теплоэнергетических характеристик бурения является определение параметров теплоотдачи инструмента, в частности коэффициента конвективной теплоотдачи от инструмента к охлаждающей жидкости или газу. Критериальные уравнения для расчета такого коэффициента,

наиболее часто используемые в расчете тепловых режимов бурения приведены в [1]. Однако рассмотренные соотношения получены для установившегося потока жидкости в каналах с постоянной температурой стенки и без учета вращения инструмента. Соотношения для расчета теплоотдачи вращающихся тел [4] также ограничены случаем горизонтально расположенных и равномерно нагретых цилиндров.

Как было показано, для работающего на забое инструмента характерно крайне неоднородное по высоте температурное поле. Очевидно, локальные коэффициенты теплообмена также будут изменяться по высоте. Выполненные экспериментальные исследования позволяют определить параметры конвективной теплоотдачи от инструмента воздуху.

Для того чтоб определить локальные значения коэффициента конвективной теплоотдачи, составим уравнение теплового баланса для элементарного участка стержня. Для установившегося теплового режима кондуктивный тепловой поток в теле инструмента, действующий от поверхности трения, будет отводиться с боковой поверхности посредством конвекции. Поток $q(x)$, подводимый к элементарному объему тела инструмента длиной Δx в сечении x по высоте, равен сумме кондуктивного теплового потока $q(x+\Delta x)$, отводимого из объема в сечении $x+\Delta x$, и конвективного теплового потока q_s , отводимого с поверхности элементарного объема

$$q(x) = q(x + \Delta x) + q_s .$$

Выражая два кондуктивных тепловых потока с помощью закона Фурье, а конвективный – с помощью закона охлаждения Ньютона, получаем

$$-\lambda F \frac{dt}{dx} \Big|_x = -\lambda F \frac{dt}{dx} \Big|_{x+\Delta x} + \alpha_x \Pi \Delta x (t(x) - t_\infty) ,$$

где λ – коэффициент теплопроводности инструмента, Вт/(м·град); F – площадь поперечного сечения элементарного объема, м²; α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·град); Π – периметр элементарного объема (м); Δx – высота элементарного объема, м; t_∞ – температура охлаждающей жидкости, °С.

Отсюда, зная распределение температуры по высоте стержня из эксперимента и общее количество теплоты трения, генерируемой на контакте, можно вычислить значения локальных коэффициентов теплообмена. Мощность тепловыделения на контакте определяется по формуле

$$Q = \mu \cdot \pi \cdot D \cdot P \cdot n ,$$

где μ – коэффициент трения пары «инструмент – горная порода»; D – диаметр инструмента, м; осевая нагрузка выражается в ньютонах, частота вращения – в оборотах в секунду.

Поскольку при моделировании разрушения горной породы не наблюдается, будем считать, что почти вся мощность, реализуемая на забое, переходит в теплоту трения. Удельный тепловой поток, поступающий на рабочий торец инструмента, определяется по формуле

$$q_0 = k_p \frac{Q}{F} ,$$

где k_p – коэффициент распределения тепловых потоков на контакте [1]. Результаты расчета коэффициентов конвективной теплоотдачи для случаев, которые описываются термограммами на рис. 1 а и б, показаны на рис. 3.

Характер поведения графиков объясняется сложной картиной теплообмена, для которой характерны резкое снижение температуры поверхности инструмента по высоте наложением свободной конвекции на вынужденную и высокая плотность теплового потока на начальном участке. Кроме того, локальные коэффициенты теплоотдачи существенно зависят от многих трудно учитываемых и изменяющихся по высоте факторов, например от чистоты обработки материала.

Как следует из приведенных данных, значения локальных коэффициентов отличаются для рассматриваемых вариантов. В то же время значения среднего коэффициента конвектив-

ной теплоотдачи, которая используется наиболее часто, различаются несущественно (на 6 %) и составляют $\alpha = 166 - 177 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

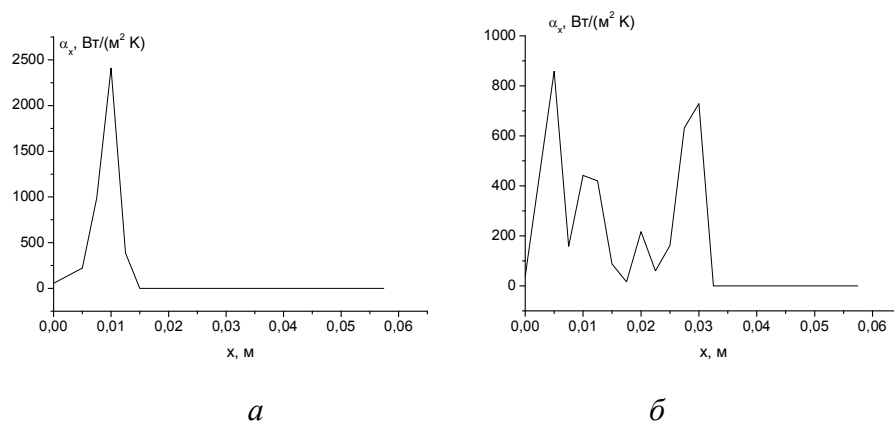


Рис 3. Кривые распределения коэффициентов теплоотдачи по высоте инструмента:
а – $P = 20 \text{ даН}$, $n = 750 \text{ об./мин}$; б – $P = 40 \text{ даН}$, $n = 750 \text{ об./мин}$

Для перехода от результатов, полученных на моделях, к реальным объектам следует использовать критерии подобия. В случае теплоотдачи такими критериями являются среднее число Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda_{\infty}},$$

где λ_{∞} – коэффициент теплопроводности окружающей среды и число Рейнольдса

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu_{\infty}},$$

где ν_{∞} – коэффициент кинематической вязкости окружающей среды, $\text{м}^2/\text{с}$, w – линейная скорость вращения инструмента, $\text{м}/\text{с}$.

Для рассмотренных случаев критерии $Nu = 76$; $Re = 390$.

Выводы

1. В работе впервые приведены результаты экспериментального исследования процесса нагревания породоразрушающего инструмента, полученные с помощью инфракрасной камеры.
2. Впервые определены локальные и средние коэффициенты теплоотдачи от вращающегося инструмента окружающему воздуху в условиях генерирования теплоты трения на контакте.
3. Результаты работы можно использовать для верификации расчетных методик по определению теплового состояния технологического инструмента.

Литература

1. Тепловой фактор при бурении скважин А. А. Кожевников, С. В. Гошовский, А. Ю. Дреус, и др. – К., 2008. – 166 с.
2. Алексеев Л. А., Ишбаев Г. Г. Об энергии на долоте и ее реализации. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. Вып.11.– 2008. – С. 56 – 58
3. Зимин А.И., Маликов Н.В. Исследование термодинамики породоразрушающего инструмента. // Горный журн.– 2006. – №2С. 111 – 116.
4. Дорфман Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. – М.: Физматгиз, 1960. – 260 с.

Поступила 12.06.09