

УДК 536.2

Дреус А.Ю.

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ СТЕРЖНЯ ПРИ ТОРЦЕВОМ НАГРЕВЕ

Представлено результати експериментального дослідження тепловіддачі циліндричного стрижня, що обертається, з урахуванням генерування теплоти тертя на торці. Отримано картину температурного поля за довжиною стрижня, та визначено локальні й середні коефіцієнти конвективної тепловіддачі. На основі обробки даних, що отримані, запропоновано критеріальне співвідношення для середнього числа Нусельта у випадку, що розглядається.

Представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи вращающегося цилиндрического стержня при генерировании теплоты трения на торце. Получена картина температурного поля по длине цилиндра, и определены локальные и средние коэффициенты конвективной теплоотдачи. На основе обработки полученных данных предложено критериальное соотношение для определения среднего числа Нуссельта для рассматриваемого случая.

The results of the experimental investigation heat transfer for rotation cylindrical rod under generating of friction heat at the rod end are present. The temperature field is obtained and local and average heat transfer coefficients are determined. On the base of experiments data the relation for Nusselt number is proposed.

 D – диаметр; Gr – число Грасгофа; H – высота стержня; h – шаг по высоте стержня; Nu – число Нуссельта; n – частота вращения; P – осевое усилие; P_r – число Прандтля; Q – количество теплоты трения; q – тепловой поток вдоль стержня; Re – число Рейнольдса; S – площадь рабочего торца; t – температура; α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности стержня; μ – коэффициент трения; ν – кинематическая вязкость воздуха; Π – периметр сечения.**Нижние индексы:** x – локальное значение; kr – критическое значение;

1 – полый стержень;

2 – сплошной стержень;

 ∞ – окружающая среда.**Введение**

Проблема выбора и обеспечения ресурсосберегающих режимов работы металлообрабатывающего, сверлильного или бурового инструмента связана с необходимостью рассмотрения теплофизических процессов, протекающих на рабочей поверхности. Известно [1–4], что значительная часть затрачиваемой на рабочей поверхности мощности не является

полезной и расходуется на нагрев, что способствует интенсивному износу инструмента. Таким образом, прогнозирование температурного режима при работе технологического инструмента и расчет режимов, обеспечивающих эффективное его охлаждение, является важной инженерной задачей. Однако одной из основных трудностей, возникающих при применении расчетных соотношений для определения

рабочей температуры, является необходимость определения коэффициентов конвективной теплоотдачи. Несмотря на достаточно большой накопленный материал по критериальным уравнениям, позволяющим определять теплоотдачу для разных случаев течений охлаждающей жидкости или газа, использование их, как показывает практика, не всегда позволяет получить физически адекватный результат при расчете тепловых режимов бурения или сверления [1]. Это обуславливает необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований по проблеме. В настоящей работе представлены результаты исследования теплоотдачи при моделировании работы технологического инструмента с использованием высокоточной технологии бесконтактного измерения температуры.

Постановка проблемы и формулирование целей исследований

Задачам контактного взаимодействия с учетом тепловыделения от трения и его влияния на износ посвящено достаточно большое количество работ, например [2–6]. Заметим, что различные предлагаемые методики расчета контактных температур и тепловых потоков не рассматривают отдельно вопрос об определении параметров теплоотдачи взаимодействующих тел в окружающую среду. В то же время, теплообмен инструмента с охлаждающей средой, во многом определяет эффективность теплоотвода от рабочей поверхности и, таким образом, тепловой режим на рабочей поверхности инструмента. Расчет теплоотдачи может быть выполнен с использованием критериальных уравнений, полученных для случая внешнего обтекания цилиндра потоком жидкости или газа приведенных, например в [7]. Однако указанные соотношения получены для условий, существенно отличных от тех, которые реализуются в задачах контактного взаимодействия инструмента с рабочей поверхностью.

Существует также ряд критериальных уравнений, полученных различными исследователями для вращающихся тел [8, 9]. Следует отметить, что количество таких работ незначительно, и в большинстве из них рассматриваются только равномерно нагретые тела, в основном горизонтально расположенные цилиндры. Использование коэффициентов теплоотдачи, рассчитанных на основе формул, приведенных в указанных работах, дает заниженные значения в случае расчета теплофизических процессов бурения (сверления). Вопросы, связанные с определением параметров теплоотдачи для вращающихся вертикальных цилиндров в условиях совместного влияния вынужденной и свободной конвекции, в задачах контактного взаимодействия, практически не освещены в литературе. Расширение базы экспериментальных данных в этом направлении будет способствовать совершенствованию расчетно-теоретического аппарата по изучению теплообмена в таких технологических процессах. Целью настоящей работы является исследование процесса теплообмена вращающегося стержня при нагреве его с торца за счет теплоты трения с окружающей средой.

Одним из современных эффективных методов определения температурного состояния исследуемого объекта, находящегося в поле непосредственного визуального контакта, являются бесконтактные методы, основанные на инфракрасных технологиях. Успехи такой измерительной техники (современные тепловизоры) позволяют проводить высокоточные измерения и оперативно подготовить и выполнить большое количество экспериментальных опытов. В предложенной работе приведены результаты экспериментов и их анализ по теплоотдаче вертикальных вращающихся стержней, которые моделировали технологический инструмент, при их торцевом нагреве.

Описание эксперимента и методики обработки результатов

Серия экспериментов по моделированию процесса работы технологического инст-

румента с генерированием теплоты трения на рабочем торце проводилась в стендовых условиях. Экспериментальная установка была основана на сверлильном станке, а в качестве моделей инструмента использовались два вида стержней (полый и сплошной) цилиндрической формы. Внешний и внутренний диаметр полого стержня, изготовленного из стали (коэффициент теплопроводности $\lambda_1 \approx 30 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$) составляет 12 и 9 мм соответственно, а диаметр сплошного стержня, изготовленного из высокотеплопроводного сплава ($\lambda_2 \approx 120 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$) – 15 мм. Торцевой нагрев стержней осуществлялся за счет генерирования теплоты трения при контакте вращающихся стержней с образцом горной породы (гранит). Образец горной породы диаметром 58 мм закреплялся на предварительно протарированных весах, что позволяло фиксировать осевое усилие на стержень. Частота вращения n (об/мин) фиксировалась тахометром. Погрешность измерения нагрузки составляла от 2,5 % до 5 %, погрешность измерения частоты вращения – 1 %.

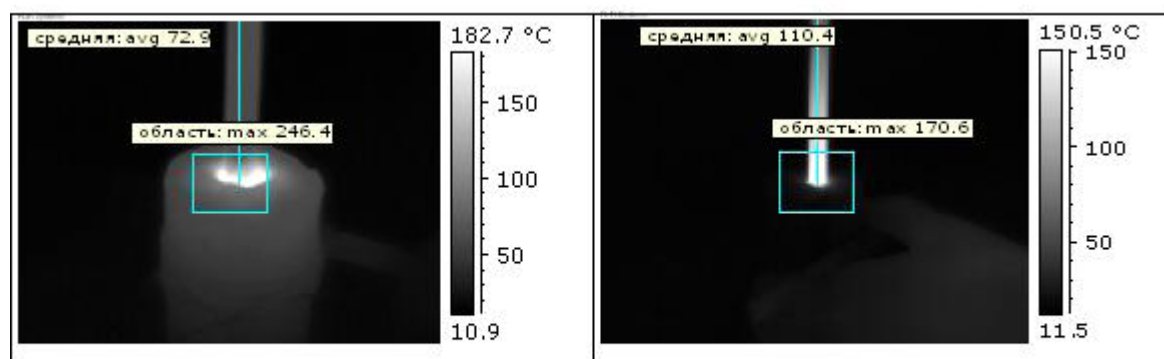
Для получения картины температурного поля стержня была использована тепловизионная инфракрасная камера AGEMA 570 производства компании FLIR Systems, прошедшая необходимую метрологическую сертификацию. Стандартный диапазон измерения для данной камеры составляет от -20 °C до $+550 \text{ °C}$.

Чувствительность камеры составляет $0,1 \text{ °C}$ при точности измерения $\pm 2 \%$ от диапазона. Использование инфракрасной камеры для измерения температуры позволило значительно сократить время на подготовку и проведение эксперимента, чем это потребовалось бы для измерения контактными датчиками, например, термопарами.

Наблюдение за температурой модели при ее трении о поверхность горной породы выполнялось до достижения установившегося теплового режима, после чего фиксировалась картина температурного состояния модели. После окончания экспериментов полученные термограммы обрабатывались на компьютере с помощью специального программного обеспечения.

Экспериментальные исследования были проведены для следующего диапазона режимных параметров. Осевая нагрузка изменялась в пределах от 20 до 60 кг, частота вращения 600 ... 750 об/мин. На рис. 1 представлены примеры термограмм, полученных в результате тепловизионной съемки.

Поскольку во время экспериментальных исследований разрушение образца горной породы было незначительно, то принималось, что вся, затраченная на контакте, механическая энергия переходила в тепловую. Замеры частоты оборотов и осевой нагрузки позволяют расчетным путем определить количество тепла, выделяемого вследствие трения



а)

б)

Рис. 1. Примеры полученных термограмм (а) для сплошного стержня; (б) для полого стержня для $P = 20 \text{ кг}$, $n = 750 \text{ об/мин}$.

$$Q = \frac{\mu \cdot \pi \cdot D \cdot P \cdot n}{S} .$$

Расчет локальных коэффициентов теплоотдачи выполнялся следующим образом. С помощью специального программного обеспечения на термограмме по высоте стержня был рассмотрен ряд точек с шагом h , в которых фиксировались координата и температура. Учитывая, что вдоль стержня тепло передается теплопроводностью, а с боковой поверхности отводится конвекцией и, пренебрегая перепадом температуры по толщине стержня, из уравнения баланса энергии можем записать выражение для определения локального коэффициента теплоотдачи

$$\alpha_x = \frac{q_{x-h/2} - q_{x+h/2}}{\Pi(t_x - t_\infty)} h .$$

В точке контакта принималось, что $q_0 = Q$, а тепловые потоки теплопроводности $q_{x+h/2} = \lambda \frac{t_{x+h} - t_{x-h}}{h}$. Значение среднего коэффициента теплоотдачи определялось соответственно

$$\alpha = \frac{1}{H} \int_H \alpha_x dx .$$

Результаты исследований и их обсуждение

Полученные в результате обработки термограмм данные по температуре стержней (рис. 2, а, 3, а) позволили провести расчет локальных и средних коэффициентов теплоотдачи (рис. 2, б, 3, б).

Для стержня, изготовленного из материала с меньшей теплопроводностью, наблюдается резкое падение температуры на начальном участке до 1 см от точки контакта, а в дальнейшем градиент температуры практически равен нулю. Для второго стержня, с более высоким коэффициентом теплопроводности, стационарное распределение температуры близко к ли-

нейному. Таким образом, большая часть теплового потока поступающего на рабочий торец за счет высокой теплопроводности передается по высоте, и влияние конвективного теплосъема с боковой поверхности на тепловое состояние данного стержня меньше. При максимальных заданных режимных параметрах для второго стержня наблюдалось оплавления торца.

В обоих случаях наблюдается достаточно сложное поведение локальных коэффициентов теплоотдачи (рис. 2, б и рис. 3, б). Отсутствие четких закономерностей в поведении локальных коэффициентов теплоотдачи наблюдалось во всех опытах. Такое крайне неравномерное распределение теплоотдачи может быть обусловлено рядом причин. Значительным перепадом температуры по высоте, наложением вынужденной и свободной конвекции, многими трудно учитываемыми факторами, например, неравномерностью чистоты обработки поверхности по высоте.

Таким образом, можно говорить о сложности определения использования на практике локальных значений коэффициентов теплоотдачи. В то же время значения среднего коэффициента теплоотдачи, как для разных экспериментов, так и для разных стержней, сохранялись одного порядка.

Для перехода от результатов, полученных на одной модели исследуемого объекта, к другим моделям, а также к реальному инструменту, следует соблюдать определенные критерии подобия. Для конвективного теплообмена такими критериями являются числа Рейнольдса, Грасгофа и Прандтля. Как уже отмечалось, в рассмотренной задаче теплоотвод от боковой поверхности будет осуществляться как за счет свободной так и вынужденной конвекции. Согласно данным Андерсена и Саундерса, приведенными в [8], влияние вращения на теплоотдачу горизонтального цилиндра начинается с определенных значений чисел Рейнольдса

$$Re_{kr} = 0,55 \sqrt{\frac{Gr}{Pr}} .$$

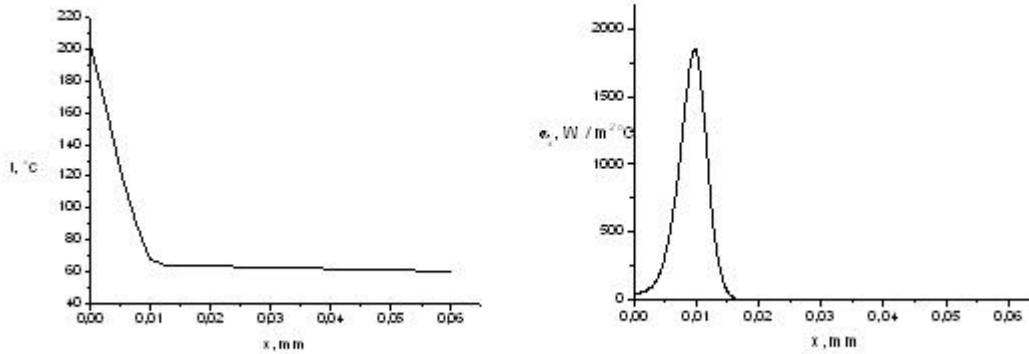


Рис. 2. Распределение температуры (а) и локальных коэффициентов теплоотдачи (б) по высоте полого стержня.

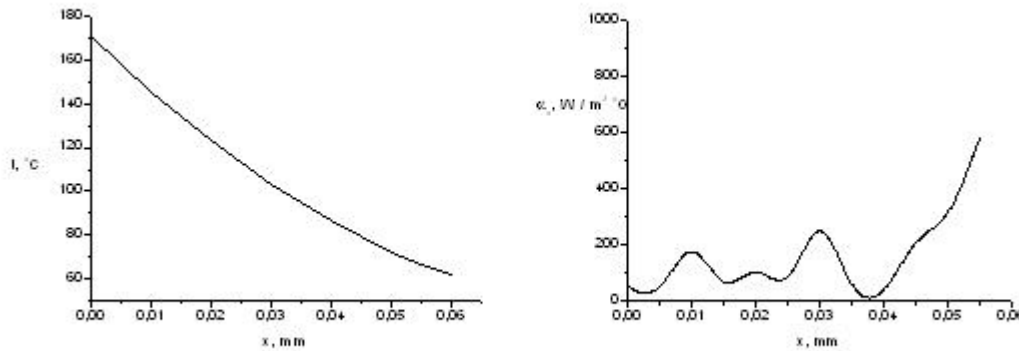


Рис. 3. Распределение температуры (а) и локальных коэффициентов теплоотдачи (б) по высоте сплошного стержня.

Превышение числа Рейнольдса критического значения наблюдалось во всех экспериментах. При этом число Рейнольдса определяется

$$Re = \frac{\pi D^2 n}{\nu}$$

Таким образом, следуя представленной в [8] методологии по определению теплоотдачи, критериальное уравнение для среднего числа Нуссельта представлялось в виде комбинации трех выше указанных критериев. На основе обработки результатов экспериментальных исследований предлагается следующее уравнение для расчета среднего числа Нуссельта

$$Nu = 4,149 \cdot \left[(Re^{1,043} + Gr) \cdot Pr \right]^{0,333}$$

Представленное уравнение удовлетворительно описывает теплоотдачу цилиндрического стержня при его торцевом нагреве в диапазоне чисел Рейнольдса $60 \leq Re \leq 10^3$ и Грасгофа $Gr \leq 5 \cdot 10^5$.

Выводы

В представленной работе исследованы процессы нагрева и охлаждения цилиндрического стержня при его торцевом нагреве. Эксперименты выполнены с использованием современных бесконтактных методик измерения тем-

пературы инфракрасной камерой. Результаты исследований позволили получить соотношение для определения коэффициента конвективной теплоотдачи, что может быть использовано для верификации соответствующих расчетных методик. Экспериментальные данные по рассмотренной задаче с использованием бесконтактных измерений получены впервые.

Автор благодарен сотрудникам ЗАТ «ЕК Днепрооблэнерго» за предоставление инфракрасной камеры для проведения экспериментальных работ, студентам и сотрудникам кафедры прикладной газовой динамики и тепломассообмена Днепропетровского национального университета, оказавшим помощь в проведении экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников А.А. Тепловой фактор при бурении скважин. / А.А. Кожевников, С.В. Гошовский, А.Ю. Дреус и др. – К.: УкрГГРИ, 2008. – 166 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. / А.Н. Резников – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. Алексеев Л.А. Об энергии на долоте и ее реализации. / Л.А. Алексеев, Г.Г. Ишбаев // Сб. науч. трудов ИСМ НАН Украины «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения», вип.11, 2008. – С.56 – 58.
4. Александров В.М. Контактная задача для тел с покрытием с учетом нелинейного трения, износа и тепловыделения от трения // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2003 – №4 – С.128 – 135.
5. Максимович В.Н. Плоская термоупругая задача с учетом тепловыделения / В.Н. Максимович, Ю.И. Бабей, П.Б. Кратюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1986 – № 6 – С.76 – 81.
6. Дреус А.Ю. О моделировании процессов теплопереноса на забое при бурении скважины / А.Ю. Дреус, А.А. Кожевников, А.И. Чайка // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29, №3. – С.29 – 35.
7. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
8. Дорфман Л.А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М.: Физматгиз, 1960. – 260 с.
9. Васильев А.Н. Об исследовании теплообмена вращающегося цилиндра при вынужденной конвекции / А.Н. Васильев, В.В. Голубев // Инж.-физ. журнал. – 1981. – №3, Т.41. – С. 414 – 421.

Получено 15.12.2009 г.