

УДК 67.03

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ И СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН

^{1,2}Булатов Н.К., ²Омаров К.А., ²Ерманов Б.Б., ¹Затынейко А.М.

¹Кокшетауский университет им. А. Мырзахметова, Кокшетау;

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, e-mail: zemailo@figjs.com

Исследование влияния различных факторов на поверхностные и объемные температуры, а также создание достаточно строгих методов теплового расчета тормозного устройства подъемно-транспортных и строительно-дорожных машин является актуальной научно-технической задачей. Одной из наиболее сложных и актуальных задач, стоящих перед исследователями и конструкторами тормозного устройства ПТ и СДМ, является выбор размеров, конструктивных форм и материалов деталей пар трения из условия достаточности энергоемкости. При решении данной задачи применительно к ПТ и СДМ необходимо располагать методом, позволяющим исследовать влияние различных факторов на температурные поля. Также необходимо определить возможности экономического и технологического развития в структуре воздействия на общие формы и порядки становления устойчивого функционирования устройств подъемно-транспортных и строительно-дорожных машин.

Ключевые слова: строительный механизм, дорожная машина, тормозные устройства, процесс нагрева, исследование

STUDY OF HEAT AND COOLING BRAKING DEVICES HANDLING AND ROAD CONSTRUCTION MACHINERY

^{1,2}Bulatov N.K., ²Omarov K.A., ²Ermanov B.B., ¹Zatyneyko A.M.

¹Kokshetau Abai Myrzahmetov University, Kokshetau;

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, e-mail: zemailo@figjs.com

Research of influence of various factors on the surface and the bulk temperature as well as the creation of sufficiently rigorous methods of thermal calculation of braking devices handling and road construction machinery is an actual scientific and technical task. One the most complex and urgent challenges facing researchers and designers of braking devices and PT SDM is a selection of sizes, shapes and materials design details of friction pairs of the energy intensity of the sufficiency conditions. In solving this problem in relation to the PT and SDM you must have the method to investigate the influence of various factors on the temperature field. It is also necessary to determine the opportunities for economic and technological development in the structure of the impact on the overall form and procedure of formation of stable functioning of hoisting devices and road construction machinery.

Keywords: construction machinery, road machine, brakes, heating process, research

Строительно-дорожные машины (СДМ) длительное время простаивают в плановых и внеплановых ремонтах или в ожидании их из-за недостаточно высокой долговечности их деталей. Так в течение года, при фактическом времени работы бульдозеров, скреперов, экскаваторов 900–2500 ч, они простаивают вследствие неисправности, аварийных поломок, ремонта до 200–300 ч. Затраты труда и денежных средств на техническое обслуживание и ремонт машин за время их эксплуатации в 5–10 раз и более превышают затраты на их изготовление [1]. За амортизационный период затраты на запасные части экскаваторов с ковшом емкостью 0,50–0,65 м³ составляют 117% от их стоимости, на производство ремонтных работ – 317% [2].

Повышение долговечности и эффективности этих машин способствует ускорению темпов работы на всех стадиях производства строительных и дорожно-строительных работ. Наиболее актуальными являются задачи, связанные с повышением срока службы быстроизнашивающихся деталей и, в частности, рабочих органов машин.

Как показали результаты исследований ряда ремонтных предприятий г. Воронежа, Липецка и Тулы, срок службы землеройных рабочих органов, которые находятся в активном взаимодействии с грунтом, составляет 5–20% от срока службы машин до планового ремонта [3]. При исследовании затрат, связанных с ремонтом различных агрегатов и узлов машин и механизмов, было установлено, что на ремонт землеройных рабочих органов затрачивается около 62% от общих средств на ремонт машины.

Большое распространение в тяжелонагруженных тормозных устройствах получили металлокерамические и минералокерамические фрикционные материалы. В США эти фрикционные материалы ставятся на тормоза самолетов, тракторов, танков, фрикционных прессов, строительно-дорожных и подъемно-транспортных машин и т.д. Столь широкое применение этих материалов объясняется их высокой износостойкостью и стабильностью коэффициента трения по сравнению с асбофрикционными материалами. Металлокерамические

материалы могут быть самого различного состава и, соответственно, иметь различные фрикционные свойства. По основному компоненту они разделяются на две группы: материалы на медной основе и материалы на железной основе

Основным видом неисправностей рабочих органов строительно-дорожных машин, являющихся причиной их простоя, является износ [4]. Рабочие органы экскаваторов, бульдозеров, скреперов, автогрейдеров по характеру выполняемых функций и своему прямому назначению работают в сыпучих, связных, мерзлых и скальных грунтах. При этом они подвержены интенсивному абразивному изнашиванию содержащимися в этих грунтах частицами и динамическим нагрузкам различной величины. Условия работы деталей машин подразделены на 12 групп, каждой из которых соответствует определенный вид изнашивания. Рабочие органы СДМ (в дальнейшем ЗРО – землеройные рабочие органы) по данной классификации отнесены к I группе, соответствующей абразивному изнашиванию при скольжении по сыпучему абразиву.

Учитывая особую важность изучения вопросов нагрева тормозов для обеспечения надежной работы механизмов подъемно-транспортных машин, работающих в условиях повторно-кратковременного режима с большим числом торможений в час, во ВНИИПТМАШе провели подробное исследование теплового режима крановых тормозов различных типов (колодочных, ленточных, дисковых). Целью исследования была разработка методики расчета тормоза по нагреву, которая бы соответствовала действительным физическим явлениям процесса торможения крановых механизмов и, таким образом, способствовала бы увеличению срока службы тормозов и повышению эксплуатационной надежности кранов.

Однако условия работы и нагруженность ЗРО в значительной степени обусловлены физико-механическими свойствами разрабатываемых грунтов, которые главным образом зависят от размеров и количественного соотношения содержащихся в них гальки, гравия, песчаных, пылеватых и глинистых частиц, а также воды [5]. Установлено, что в процессе эксплуатации рабочих органов происходит деформирование поверхности трения, которое сопровождается глубинным наклепом. Величина наклепа зависит от степени динамичности нагрузки [6]. Поэтому за основу анализа условий эксплуатации и изнашивания ЗРО нельзя однозначно принимать предложенную схему фрикционных контактов «изнашивание при скольжении по сыпучему абразиву».

Средняя мощность для определения нагрева поверхности трения по тепловым характеристикам для подъемно-транспортной машины, имеющей определенную загрузку, подсчитывается по графику работы. Для этого определяется средняя мощность торможения в наиболее напряженный период времени работы механизма. Продолжительность этого периода во избежание перегрева тормоза принимается равной двум-трем постоянным времени его нагрева. Если тормоз был до этого времени холодным, то за время равное двум-трем постоянным времени нагрева он не нагреется до установившейся температуры. Однако до наступления рассматриваемого периода времени тормоз мог быть уже нагрет до некоторой температуры. Тогда при продолжении работы на наиболее напряженном участке тормоз относительно быстро нагревается до установившейся температуры, которая может быть больше или меньше.

Как известно, распределение тепла в твердом теле тормозного устройства ПТ и СДМ, используя теплопроводность, можно описать дифференциальным уравнением Фурье [3]:

$$\frac{\partial T_t}{\partial T} = K_{\text{т.пр}} \left(\frac{\partial^2 T_t}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_t}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T_t}{\partial Z^2} \right), \quad (1)$$

где T_t – температура твердого тела тормозного устройства, °C; $K_{\text{т.пр}} = \frac{K_{\text{т.плл}}}{c \cdot \gamma}$ – ко-

эффициент температуропроводности твердого тела тормозного устройства, м³/ч; $K_{\text{т.плл}}$ – коэффициент теплопроводности, ккал/м·ч·град; c – удельная теплоемкость, ккал/кг·град; γ – удельный вес твердого тела, кг/м³.

В связи с тем, что тепло, генерирующееся на поверхностях трения при торможении, определенным образом распределяется между деталями пар трения, то для тормозного барабана и фрикционной накладки уравнение (1) необходимо представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial T} &= K_{\text{т.пр.б}} \left(\frac{\partial^2 T_{\phi}}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 T_{\phi}}{\partial Y_1^2} + \frac{\partial^2 T_{\phi}}{\partial Z_1^2} \right) \\ \frac{\partial T_{\phi}}{\partial T} &= K_{\text{т.пр.ф}} \left(\frac{\partial^2 T_{\phi}}{\partial X_2^2} + \frac{\partial^2 T_{\phi}}{\partial Y_2^2} + \frac{\partial^2 T_{\phi}}{\partial Z_2^2} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где T_{ϕ} и T_{ϕ} – температуры соответственно тормозного барабана и фрикционной накладки; $K_{\text{т.пр.б}}$ и $K_{\text{т.пр.ф}}$ – коэффициенты температуропроводности материалов соответственно тормозного барабана и фрикционной накладки.

Следует отметить, процесс теплоотдачи на границах любого тела описывается дифференциальным уравнением теплообмена [1, 2].

$$K_{\text{т.отд}} = - \left(\frac{K_{\text{т.пл.в}}}{\Delta T} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\text{п.с}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{т.отд}}$ – коэффициент теплоотдачи; $K_{\text{т.пл.в}}$ – коэффициент теплопроводности окружающей среды; $\Delta T = (T_{\text{п}} - T_{\text{ок.ср}})$ – разность температур поверхности тела и окружающей среды; $(\partial T / \partial n)_{\text{п.с}}$ – температурный градиент в пограничном слое.

Используя уравнение Фурье – Кирхгофа [2], которое устанавливает связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке движущейся среды, имеем следующее:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_B}{\partial t} + \vartheta_x \frac{\partial T_B}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial T_B}{\partial y} + \vartheta_z \frac{\partial T_B}{\partial z} = \\ = K_{\text{т.пр.в}} \left(\frac{\partial^2 T_B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_B}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$ – скорости движения воздуха вдоль соответствующих осей, м/с; $K_{\text{т.пр.в}}$ – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/ч.

Из выражения (4) следует, что температурное поле зависит от скоростей $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$. Следует указать, что к уравнениям (1)–(4) необходимо присоединить систему из трех уравнений [1–3], описывающих движение несжимаемой жидкости (уравнение Навье – Стокса):

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial \vartheta_x}{\partial t} + \rho \left(\vartheta_x \frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_x}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + K_{\text{дин.в}} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_x}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{\partial \vartheta_y}{\partial t} + \rho \left(\vartheta_x \frac{\partial \vartheta_y}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial \vartheta_y}{\partial y} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_y}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + K_{\text{дин.в}} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_y}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{\partial \vartheta_z}{\partial t} + \rho \left(\vartheta_x \frac{\partial \vartheta_z}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial \vartheta_z}{\partial y} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + K_{\text{дин.в}} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где g_x, g_y, g_z – проекция вектора силы тяжести на соответствующие оси, кг; ρ – плотность воздуха, кг·с²/м⁴; P – давление воздуха, кг/м²; $K_{\text{дин.в}}$ – коэффициент динамической вязкости, кг·с/м².

Так как в уравнения движения входят две новые неизвестные величины, то есть плотность ρ и давление P , следовательно, число неизвестных оказалось больше числа уравнений. Чтобы раскрыть статическую неопределенность, необходимо к уравнениям

(1)–(5) добавить уравнение состояния и уравнение сплошности.

Состояние идеального газа, к которому с некоторыми допущениями необходимо отнести и воздух, описывается уравнением Клайперона [2]:

$$\frac{P}{\rho} = R_0 T_{\text{абс}}, \quad (6)$$

где R_0 – газовая постоянная; $T_{\text{абс}}$ – абсолютная температура.

Представим уравнение сплошности в следующем виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta_y}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} \right) = 0. \quad (7)$$

Рассмотрим воздух как несжимаемую жидкость, тогда имеем следующее выражение:

$$\left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta_y}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} \right) = 0. \quad (8)$$

Следовательно, выражения (1)–(8) описывают процессы, происходящие при нагреве и охлаждении тормозных устройств ПТ и СДМ в общем виде.

Для получения одного частного из множества возможных решений, соответствующего данному тормозному устройству и данным условиям протекания процессов нагрева и охлаждения, необходимо привести конкретные особенности данного явления, выделяющие его из всего класса однородных явлений [5].

Следует отметить, что дополнительные условия в совокупности с системами дифференциальных уравнений (1)–(7) устанавливают единичное явление. Такие дополнительные условия называются условиями однозначности, которые включают: временные условия, характеризующие особенности протекания процесса во времени; граничные условия, характеризующие особенности протекания процессов на границах тела; физические условия,

характеризующие физические свойства среды и тела; геометрические условия, характеризующие форму и размеры тела, в котором протекает тормозной процесс.

Начальные или временные условия определяют начальное тепловое состояние фрикционно взаимодействующих тел рассматриваемых тормозных устройств ПТ и СДМ. Следовательно, задание начальных условий состоит в выявлении и установлении распределения температур внутри фрикционно взаимодействующего тела тормозного устройства ПТ и СДМ в момент времени:

$$T(z, y, z, 0) = T(x, y, z). \quad (9)$$

При повторно-кратковременном режиме работы тормозных устройств грузоподъемных кранов и при сравнительно длительных торможениях на участках пути с чередующимися подъемами и спусками температуры в начале процессов торможения и оттормаживания, то есть в начале нагрева и охлаждения, переменны, следовательно, имеют место сложные начальные условия [4].

В случае, когда рассматриваются специальные режимы работы тормозных устройств ПТ и СДМ, следует принимать равномерное распределение температуры в начальный момент времени процесса торможения. Тогда имеем

$$T(z, y, z, 0) = T_0 = T_B = \text{const}, \quad (10)$$

где T_B – температура окружающей среды.

В основном рассматриваются граничные условия первого, второго и третьего родов. Граничные условия первого рода заключаются в задании температуры поверхности фрикционно взаимодействующего тела тормозного устройства ПТ и СДМ в любой момент времени, то есть

$$T_{\text{п}}(t) = f(t), \quad (11)$$

где $T_{\text{п}}$ – температура поверхности фрикционно взаимодействующего тела тормозного устройства.

Граничные условия третьего рода характеризуют закон конвективного теплообмена между поверхностью тела тормозного устройства и окружающей средой. В связи со сложностью данного закона, для упрощения задачи следует принять, что при охлаждении он описывается формулой Ньютона:

$$Q_{\text{п}}(t) = K_{\text{т.отд}} [T_{\text{п}}(t) - T_B(t)]. \quad (12)$$

На основе принципа равенства подводимого и отводимого тепла получим следующее:

$$K_{\text{т.пл}} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_n + K_{\text{т.отд}} [T_{\text{п}}(t) - T_B(t)] = 0. \quad (13)$$

Следовательно, для реализации граничных условий третьего рода необходимо иметь данные о коэффициентах теплоотдачи $K_{\text{т.отд}}$ и температуре окружающей среды [6].

Параметрами, характеризующими физические свойства фрикционно взаимодействующего тела тормозного устройства и среды, являются: плотность, удельные теплоемкости и коэффициенты теплопроводности. К конструктивным параметрам, влияющим на температуру поверхности трения в тормозных устройствах ПТ и СДМ, следует отнести углы охвата и несимметричности накладок, ширину пояса трения, размеры и форму поверхности охлаждения. Для каждого конкретного случая необходимо проинтегрировать уравнение теплопроводности при соответствующих условиях однозначности.

На основе анализа влияния различных факторов на поверхностные и объемные температуры фрикционно взаимодействующих элементов тормозных устройств ПТ и СДМ была разработана аналитическая модель теплового расчета тормозного механизма.

Список литературы

1. Бородин Д.М., Созонов С.В. Ремонты строительных дорожных машин в полевых условиях // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы Международной научно-технической конференции. – 2015. – С. 57–61.
2. Данилов А.В. Определение предотказного состояния дизельных двигателей строительного-дорожных машин // Наука 21 века: новый подход: материалы 13 молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Научно-издательский центр «Открытие». – 2015. – С. 54–57.
3. Деханов С.М., Фоменко Ю.О., Кухтинов С.О. Имитационный стенд гидросистем строительного-дорожных машин // Избранные доклады 61-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. – 2015. – С. 394–395.
4. Клишев И.А. Совершенствование структуры металла деталей и агрегатов строительного-дорожных машин // Фундаментальные и прикладные науки – основа современной инновационной системы: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2015. – С. 165–169.
5. Огай В.А., Довбыш В.О., Медведев Е.В. Увод от управляемого движения строительного-дорожных машин под действием внешних сил // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: труды IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения) / редакционная коллегия: А.В. Гордеев, В.И. Малышев, Л.А. Резников, А.С. Селиванов. – 2015. – С. 455–457.
6. Попов Д.А., Патиюков С.С. Особенности условий эксплуатации рабочих органов строительного-дорожных машин и факторы, влияющие на их ресурс // Воронежский научно-технический Вестник. – 2015. – Т. 4. – № 1. – С. 85–94.
7. Фоменко Н.А., Богданов В.И., Бурлаченко О.В., Алексиков С.В. Система защиты гидропривода строительного-дорожных машин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2015. – № 40 (59). – С. 219–229.