

УДК 658.58

*Шамрай Ю. А.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
д.т.н. Сидоров В. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, joukserin@gmail.com)*

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ХОЛОДИЛЬНИКА МНЛЗ

В работе приведен комплекс математических моделей, необходимых при разработке моделей развития повреждений как информационной основы риск-ориентированной стратегии технического обслуживания. Для холодильника с шагающими балками сортовой машины непрерывного литья заготовок разработаны модели силового и теплового воздействия на элементы механизма, рассмотрена кинематика движения подвижных реек и кантуемого слитка.

Ключевые слова: математическая модель, риск-ориентированная стратегия, холодильник МНЛЗ, траектория движения, температурное поле, деформации, напряжения.

Снижение количества ремонтного персонала, увеличение количества оборудования, участвующего в технологическом процессе, повышение потерь при нарушениях его функционирования могут компенсироваться за счёт использования информационных технологий обслуживания оборудования. На металлургических предприятиях при реализации технического обслуживания и ремонтов (ТО и Р) оборудования сейчас отмечается переход к риск-ориентированным стратегиям [1–3], в которых планирование и принятие решений о техническом обслуживании и ремонтах машин и агрегатов основывается на оценке возможного ущерба из-за нарушения или потери работоспособности.

Менеджмент риска опирается на стандарты [4–10], в которых предлагается рассматривать промышленный объект в аспектах качественного и количественного анализа возможности возникновения отказов, используя статистическую информацию о надёжности отдельных элементов. Исходная информация в данном случае представляется в виде известных значений вероятности безотказной работы элементов или интенсивности ранее произошедших отказов и позволяет определить приоритетность ТО и Р оборудования. Однако получение

достоверной информации о безотказности элементов металлургического оборудования остается нерешенной задачей. При отсутствии или малых объемах информации о нежелательных событиях (неисправностях, поломках, отказах) дополнительным источником могут выступать результаты математического моделирования.

В статье представлен комплекс математических моделей элементов холодильника МНЛЗ, которые выступают источниками информации для реализации риск-ориентированного технического обслуживания.

Холодильник МНЛЗ представляет собой сложную техническую систему, включающую электрическую, механическую, гидравлическую подсистемы и систему управления, взаимодействующие между собой и находящиеся под влиянием внешних и внутренних факторов. Элементы механизмов холодильника испытывают циклические силовые и температурные воздействия, характерные для условий эксплуатации металлургических машин.

С позиций теории надежности холодильник МНЛЗ, как и всякая металлургическая машина, является восстанавливаемой системой. Поддержание и восстановление работоспособного состояния осуще-

ствляется при проведении ТО и Р в ограниченные временные интервалы.

Для получения информации о функциональных параметрах холодильника МНЛЗ разработан комплекс математических моделей. Ключевые положения и результаты основных из них приведены далее.

Модель траектории движения подвижных балок холодильника [11, 12] основана на том, что в конструкции холодильника выделена структурная группа (рис. 1), представляющая собой рычажный механизм, включающий два контура ABCD и FECD, которые можно представить в виде системы уравнений в векторной форме

$$\begin{cases} \vec{l}_{AD} + \vec{l}_{DC} + \vec{l}_{CB} = \vec{l}_{AB}, \\ \vec{l}_{FD} + \vec{l}_{DC} + \vec{l}_{CE} = \vec{l}_{FE} \end{cases}$$

и координатной форме

$$\begin{cases} l_{AD} \cos \varphi_4 + l_{DC} \cos \varphi_3 + l_{CB} \cos \varphi_2 = \\ = l_{AB} \cos \varphi_1, \\ l_{AD} \sin \varphi_4 + l_{DC} \sin \varphi_3 + l_{CB} \sin \varphi_2 = \\ = l_{AB} \sin \varphi_1, \\ l_{FD} \cos \varphi_6 + l_{DC} \cos \varphi_3 + l_{CE} \cos \varphi_5 = \\ = l_{FE} \cos \varphi_1, \\ l_{FD} \sin \varphi_6 + l_{DC} \sin \varphi_3 + l_{CE} \sin \varphi_5 = \\ = l_{FE} \sin \varphi_1. \end{cases}$$

Цикл движения холодильника включает следующие этапы: 1) подъем подвижных балок вместе с заготовками (прямой ход — выдвижение штоков гидроцилиндров вертикального перемещения); 2) горизонтальное перемещение подвижных балок (прямой ход — выдвижение штоков гидроцилиндров горизонтального перемещения); 3) опускание подвижных балок в исходное положение (обратный ход — втягивание штоков гидроцилиндров вертикального перемещения); 4) горизонтальное перемещение подвижных балок в исходное положение (обратный ход — втягивание штоков гидроцилиндров горизонтального перемещения).

На разных этапах движения обобщенной координатой выступают длины звень-

ев l_{AB} , l_{FE} , l_{DC} , которые зависят от хода гидроцилиндров. Для определения координат шарниров B , C , E получены выражения для расчёта углов φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 , φ_5 , φ_6 , определяющих положения звеньев согласно зависимостям:

$$x_B = l_{AB} \cos \varphi_1; y_B = l_{AB} \sin \varphi_1;$$

$$x_E = x_{E0} + l_{EF} \cos \varphi_4; y_E = y_{E0} + l_{EF} \sin \varphi_4;$$

$$x_C = x_D + l_{DC} \cos \varphi_3; y_C = y_D + l_{DC} \sin \varphi_3.$$

Результатом моделирования являются графики рассчитанных траекторий перемещения шарниров B и C (рис. 2), соответствующих точкам крепления гидроцилиндров вертикального и горизонтального перемещения.

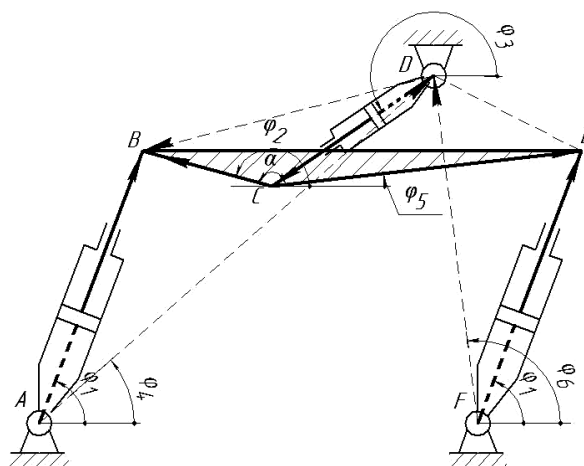


Рисунок 1 Расчетная схема рычажного механизма шагания холодильника

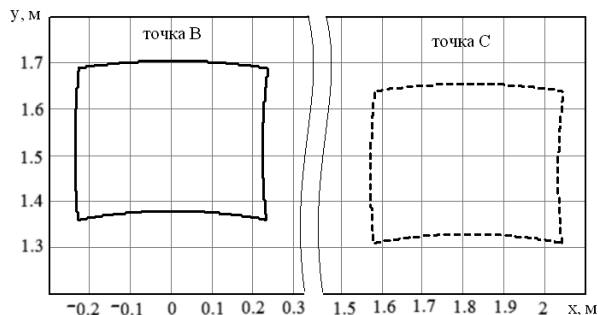


Рисунок 2 Эталонные траектории движения точек крепления гидроцилиндров вертикального (B) и горизонтального (C) перемещения балок холодильника МНЛЗ

Проверка адекватности математической модели выполнена путём качественного сравнения с траекторией, полученной при оцифровке видеоизображения работающего холодильника, и в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D. Расхождение между расчётными и измеренными значениями составило менее 1 %.

Анализ перемещения подвижных балок по установленной расчётной траектории, на основании составленных графических схем (рис. 3), позволил установить, что за один цикл движения, в ходе которого заготовка кантуется на 90 градусов, она выступает как источник 4-х ударных воздействий — по два при подъёме и опускании подвижных балок.

Математическая модель кинематических параметров движения холодильника позволяет рассчитать скорости и ускорения звеньев механизма на основе решения систем уравнений (контур ABCD, рис. 1):

$$\begin{cases} l_{AB} \sin \varphi_1 \cdot \omega_1 + l_{DC} \sin \varphi_3 \cdot \omega_3 = -v_{AB} \cos \varphi_1, \\ l_{AB} \cos \varphi_1 \cdot \omega_1 + l_{DC} \cos \varphi_3 \cdot \omega_3 = v_{AB} \sin \varphi_1 \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} v_{AB} \cdot \omega_1 \cdot \sin \varphi_1 - l_{AB} (\varepsilon_1 \sin \varphi_1 - \omega_1^2 \cos \varphi_1) + \\ + l_{DC} (\varepsilon_3 \sin \varphi_3 - \omega_3^2 \cos \varphi_3) = \\ = -a_{AB} \cos \varphi_1 - v_{AB} \cdot \omega_1 \cdot \sin \varphi_1, \\ v_{AB} \cdot \omega_1 \cdot \cos \varphi_1 - l_{AB} (\varepsilon_1 \cos \varphi_1 + \omega_1^2 \sin \varphi_1) + \\ + l_{DC} (\varepsilon_3 \cos \varphi_3 + \omega_3^2 \sin \varphi_3) = \\ = a_{AB} \sin \varphi_1 - v_{AB} \cdot \omega_1 \cdot \cos \varphi_1. \end{cases}$$

Результат модели — графики изменения хода, линейного ускорения штоков гидроцилиндров, угловой скорости и углового ускорения гидроцилиндров (звенья AB и DC) во времени при заданных графиках скоростей штоков (рис. 4).

На основании полученных графиков ускорений можно отметить, что максимальные значения углового ускорения для звена 1 (AB) отмечаются в начале этапа 4 при разгоне штока, а для звена 3 — в начале этапа 1. Это означает, что в данные мо-

менты времени на звенья действуют максимальные динамические нагрузки.

Силовое воздействие заготовки вызывает деформацию реек. Для получения первичной информации о деформациях, отвечающих работоспособному состоянию конструкции, разработана *математическая модель статических прогибов реек подвижных балок* от веса заготовок в процессе заполнения холодильника.

Рейка подвижной балки представлена как двухопорная балка с переменным поперечным сечением (рис. 5). Правая опора B — жёсткая, левая опора A — подвижная. Нагрузка на рейку изменяется при заполнении рейки заготовками. Модель основана на уравнении прогибов

$$EIy(x) = EIy_0 + EI\theta_0 x + \sum_{u=1}^{nz+2} F_{u,iz} \frac{(x - xk_u)^3}{3!},$$

где E — модуль упругости материала балки; I — момент инерции поперечного сечения балки; y — прогиб балки в текущем сечении; x — координата, определяющая положение рассматриваемого сечения балки; y_0, θ_0 — прогиб и угол поворота сечения балки в начальном сечении ($x=0$); u — номер участка; nz — общее количество заготовок; iz — текущее количество заготовок; $F_{u,iz}$ — сила, действующая на участке u при количестве заготовок iz , которая может принимать значения

$$F_{u,iz} = \begin{cases} 0; \\ R_A \vee R_B; \\ G_1; \end{cases}$$

xk_u — координата по оси X, характеризующая точку приложения силы.

Опорные реакции R_A, R_B в зависимости от количества заготовок iz , расположенных на рейке, определяются по формулам:

$$R_{A,iz} = \frac{G_1}{b} \cdot \sum_{i=1}^{iz} [c - (k + (i-1) \cdot h)],$$

$$R_{B,iz} = \frac{G_1}{b} \cdot \sum_{i=1}^{iz} [b + c - (k + (i-1) \cdot h)],$$

где G_1 — сила тяжести одной заготовки, приходящаяся на одну рейку; k — расстояние до 1-й впадины; h — расстояние между впадинами.

Для определения начальных параметров y_0 , θ_0 при количестве заготовок, равном iz , получены зависимости [13]:

$$EI\theta_{0,iz} = \frac{1}{b} \left[\sum_{u=1}^{na+nb+2} F_{u,iz} \cdot \frac{(a+b-xk_u)^3}{6} - \sum_{u=1}^{na+2} F_{u,iz} \cdot \frac{(a-xk_u)^3}{6} \right],$$

$$EIy_{0,iz} = -EI\theta_{0,iz} \cdot a - \sum_{u=1}^{na+2} F_{u,iz} \cdot \frac{(a-xk_u)^3}{6},$$

где na , nb — количество заготовок, размещаемых на консольном a и центральном b участках рейки.

В результате моделирования получено изменение опорных реакций рейки подвижной балки при постепенной загрузке холодильника заготовками и графики прогибов рейки при различном количестве заготовок (рис. 6).

Максимальные прогибы рейки наблюдаются при загрузке 5-ю и 15-ю заготов-

ками. При полной загрузке 20-ю заготовками прогибы находятся в пределах 0...0,4 мм. При нарушении равномерного распределения массы заготовки между рейками прогибы возрастают. Так, если масса заготовки воспринимается только двумя рейками, прогибы увеличиваются и их значения достигают 2...7 мм, что является критичным для прочности рейки.

Для учёта реальной формы рейки (наличие впадин и выступов) проведено моделирование статических прогибов в пакете ANSYS с использованием метода конечных элементов [13]. Результаты моделирования при нагружении рейки 1-й и 20-ю заготовками и распределении массы на две рейки в виде картин суммарных эквивалентных напряжений представлены на рисунке 7.

Максимальные значения эквивалентных напряжений составляют 140...170 МПа, что соответствует запасу прочности на уровне 2,5...3,0. Однако ступенчато изменяющийся знакопеременный характер напряжений в местах креплений рейки указывает на возможность возникновения усталостных повреждений, включая малоцикловые, с учётом дополнительных ударов, возникающих при кантовке заготовки.

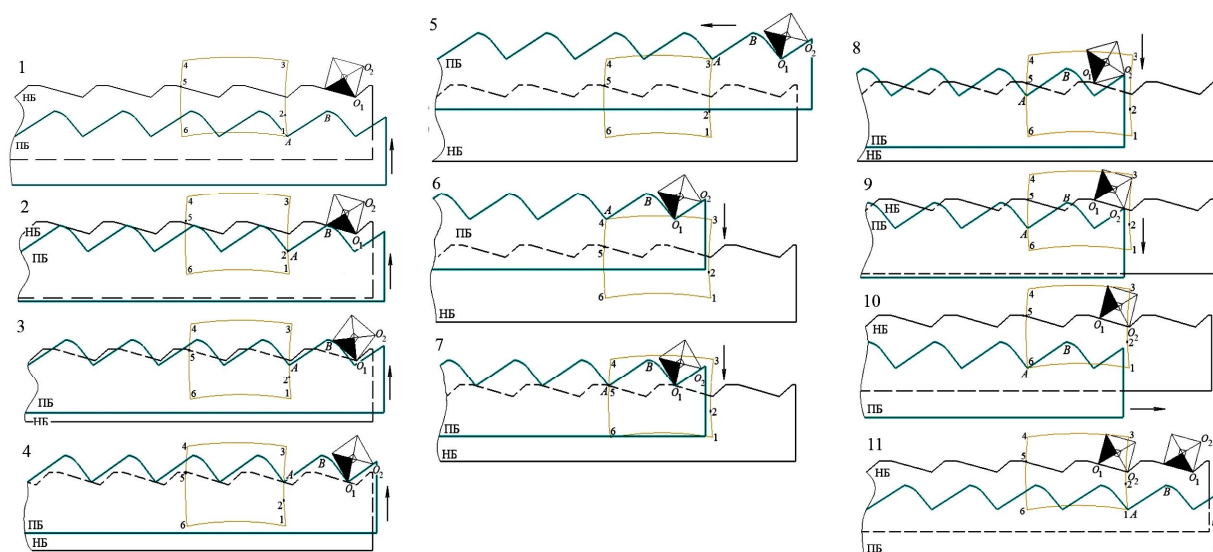


Рисунок 3 Схемы кантовки заготовки

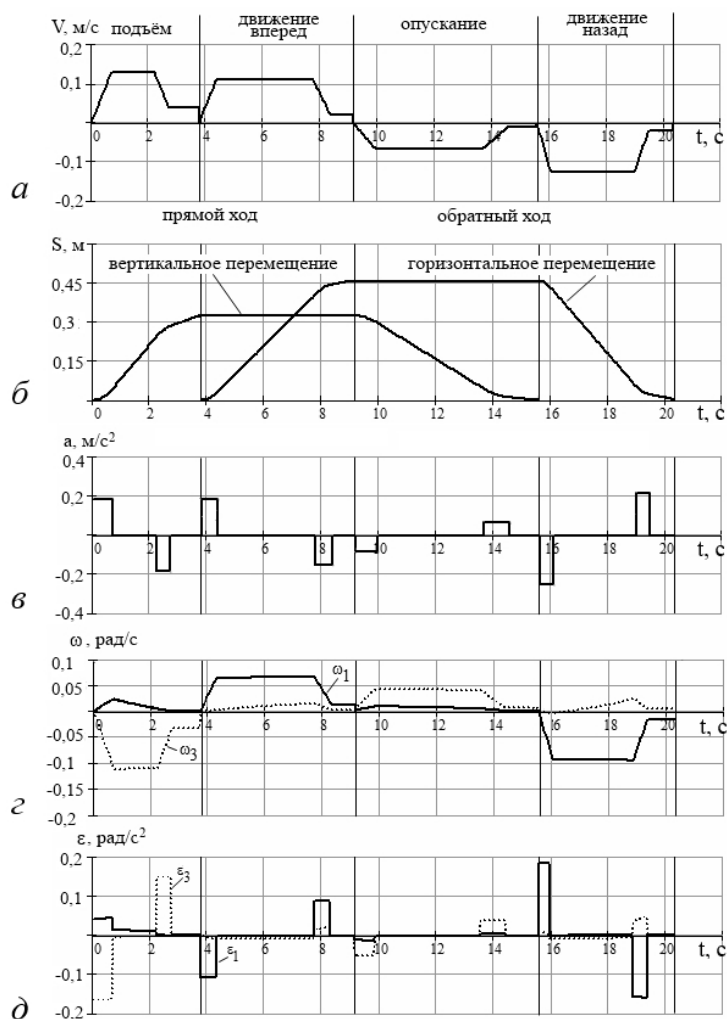


Рисунок 4 Графики изменения хода (б), линейного ускорения (в) штоков гидроцилиндров, угловой скорости (г) и углового ускорения (д) гидроцилиндров во времени при заданных графиках скоростей (а) штоков

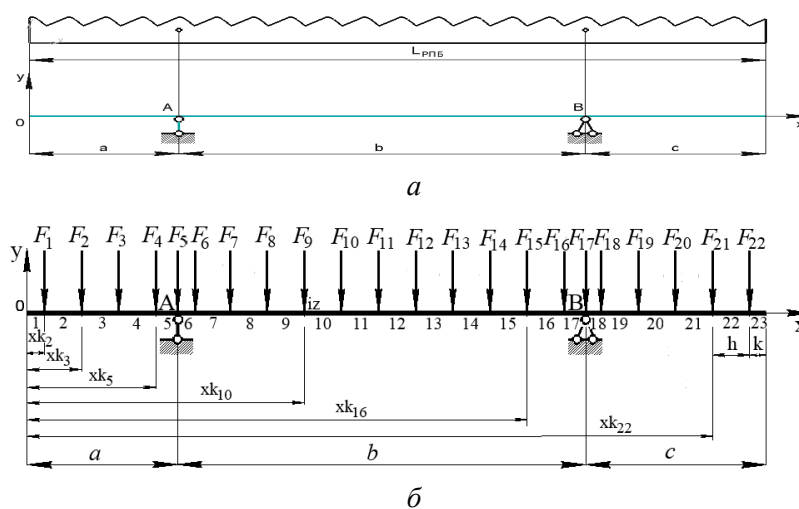
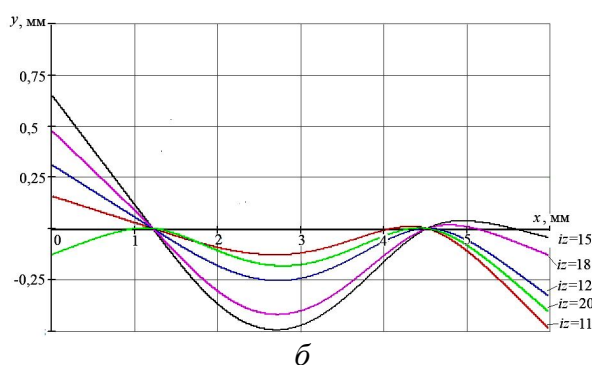
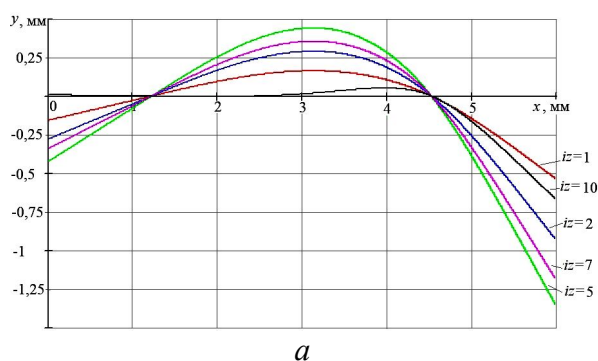


Рисунок 5 Конструкция рейки подвижной балки (а) и расчётная схема (б)



а) 1...10 заготовок; б) 11...20 заготовок

Рисунок 6 Графики прогибов рейки при различном количестве заготовок

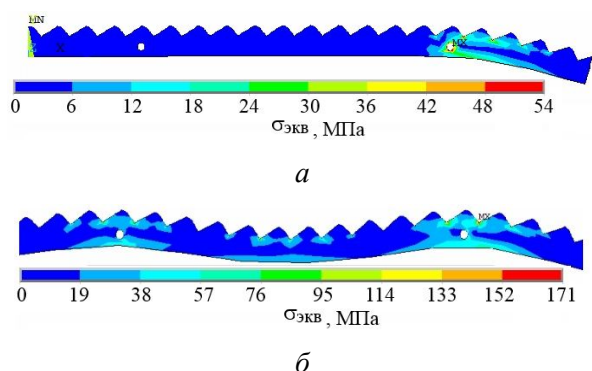


Рисунок 7 Результаты моделирования при нагружении рейки 1-й (а) и 20-ю (б) заготовками

Модель силового статического нагружения гидроцилиндров за цикл движения при полной загрузке холодильника заготовками базируется на системе из трёх уравнений статики, составленной для рычажного механизма (рис. 1) и учитывающей траекторию движения и переменный характер дейст-

вующих нагрузок — силы тяжести G подвижной части и силы инерции $F_{ин}$:

$$G = \begin{cases} m_{\delta} g, & t = 0 \dots t_1; \\ (m_{\delta} + m_3) g, & t = t_4 \dots T_{ц}; \end{cases} \quad F_{ин} = \frac{G}{g} a_S,$$

где m_{δ} , m_3 — масса подвижных балок и суммарная масса заготовок; a_S — линейное ускорение подвижной части холодильника.

Результат модели — силы сопротивления, действующие в процессе движения на штоках гидроцилиндров вертикального (P_1 , P_3) и горизонтального (P_4) перемещения гидроцилиндров (рис. 8).

Можно отметить, что нагрузка на гидроцилиндр вертикального перемещения балок, установленный по ходу движения заготовок с левой стороны секции, в 2...3 раза выше, чем на гидроцилиндр, установленный справа. Нагрузка на гидроцилиндры горизонтального перемещения балок носит знакопеременный характер и в 2...5 раз меньше, чем на гидроцилиндры вертикального перемещения. Установленные закономерности следует учитывать при формировании приоритетов ТО и Р данных элементов холодильника.

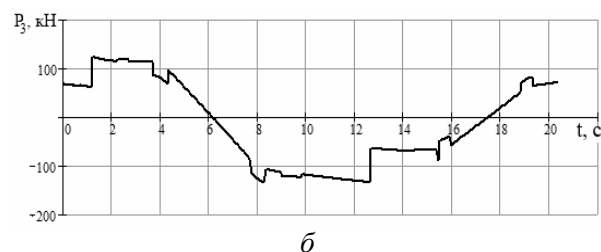
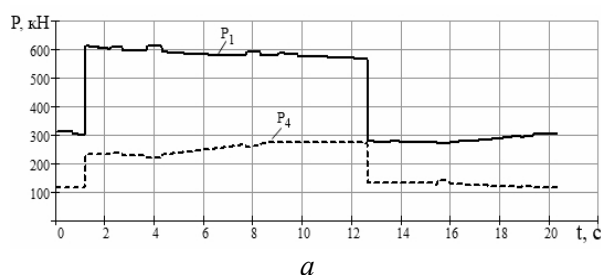


Рисунок 8 Изменение сил сопротивления на штоках гидроцилиндров вертикального (а) и горизонтального (б) перемещения за цикл движения холодильника

Заготовки, перемещаемые холодильником, оказывают не только силовое, но и тепловое воздействие на элементы конструкции холодильника. Для изучения этого воздействия разработаны *математические модели температурных полей* элементов холодильника — рейки подвижной балки, гидроцилиндра вертикального перемещения и гидроцилиндра горизонтального перемещения (рис. 9).

Математическое описание температурного поля каждого из указанных элементов конструкции представлено в виде уравнения теплопроводности:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(-\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(-\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right),$$

где $T=f(x, y, z, t)$ — температура произвольной точки (x, y, z) конструкции; t — время; λ — теплопроводность материала объекта; c — теплоёмкость материала объекта; ρ — плотность материала объекта, которое определяет значение температуры в любой точке конструкции в произвольный момент времени.

Теплофизические свойства (теплопроводность, теплоёмкость, плотность) материала элементов конструкции холодильника (сталь) рассматривались переменными в зависимости от температуры объекта:

$$\lambda = f(T), c = f(T), \rho = f(T).$$

Начальные условия в модели заданы в виде начальной температуры в каждой точке рассматриваемого объекта

$$T|_{t=0} = T_0(x, y, z).$$

Граничные условия заданы условиями II и III рода, которые представлены плотностью теплового потока на поверхностях элементов конструкций как функции координат точек поверхности и времени

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_S = q_S = \psi(x, y, z, t), \quad x, y, z \in S$$

по закону Стефана — Больцмана

$$q_n = \varphi_{1-2}\varepsilon_{np}C_0\left[\left(\frac{T_{заг}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_S}{100}\right)^4\right],$$

где n — внутренняя нормаль к поверхности S ; φ_{1-2} — угловой коэффициент излучения; ε_{np} — приведенная степень черноты между поверхностями заготовки и тела; C_0 — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, $C_0=5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $T_{заг}$ — температура поверхности заготовки; T_S — температура поверхности объекта, и по закону Ньютона

$$q_S = \pm\alpha(T_S - T_c),$$

где α — коэффициент теплоотдачи; T_S — температура поверхности; T_c — температура среды.

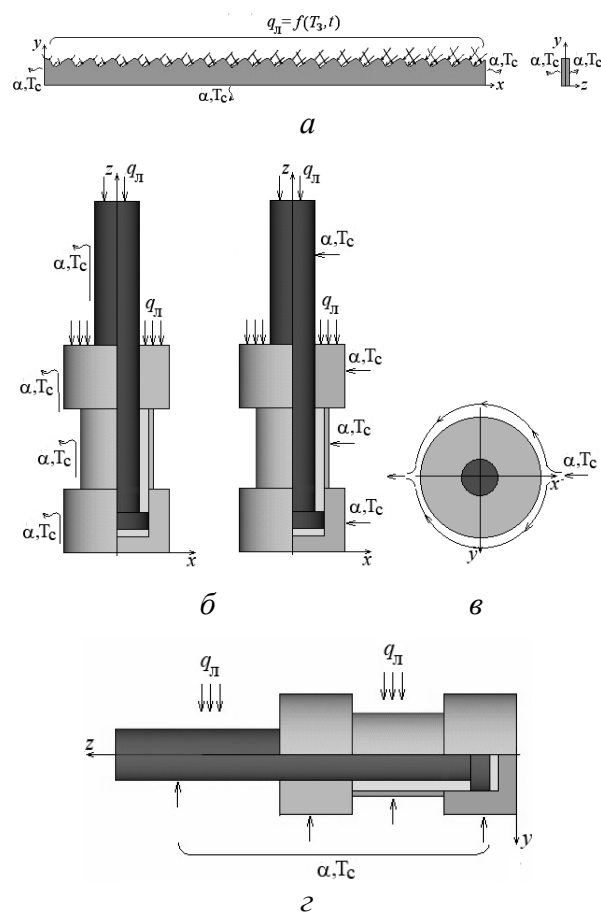


Рисунок 9 Расчётные схемы для математической модели температурных полей рейки подвижной балки (а), гидроцилиндра вертикального перемещения, установленного на «холодной» (б) и «горячей» (в) стороне холодильника, гидроцилиндра горизонтального перемещения (з)

Здесь коэффициент теплоотдачи α также является переменным. Его значения определяются по критериальным соотношениям Нуссельта с учётом режима движения воздушной среды.

Результаты математического моделирования представлены картинками распределения температуры в исследуемом элементе конструкции в различные моменты времени (рис. 10).

Установлено, что температурные поля в конструкции имеют неравномерное распределение. Однотипные элементы, расположенные в разных частях холодильника, имеют как количественные, так и качественные температурные различия, что обуславливает разный уровень риска и приоритетности при планировании их технического обслуживания и ремонтов.

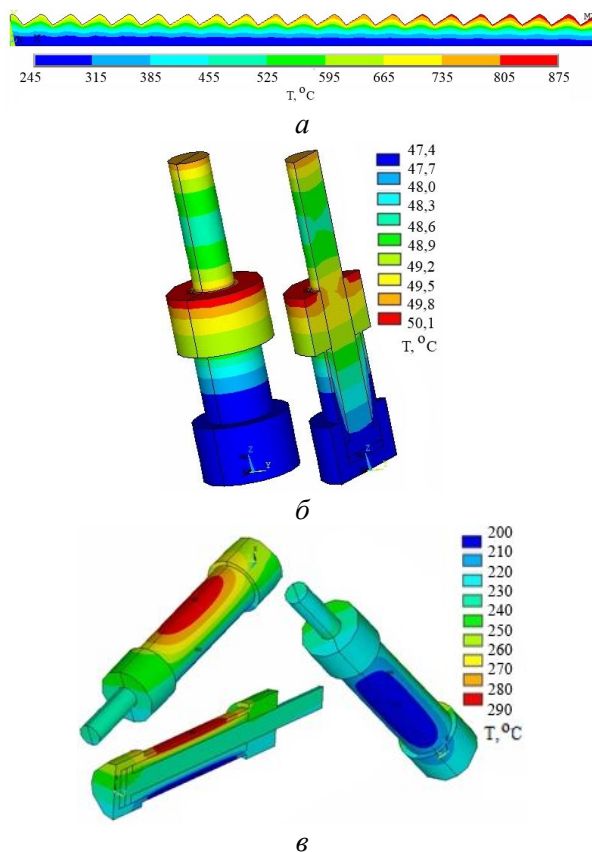


Рисунок 10 Распределение температуры в подвижных рейках первой секции (а), гидроцилиндрах вертикального (б) и горизонтального (в) перемещения через 24 ч работы

Нагрев элементов конструкции холодильника приводит к дополнительным деформациям и связанным с ними напряжениям, определение которых выполняется с помощью *математической модели температурных деформаций ΔX_T и напряжений σ_T*

$$\sigma_T = E\alpha_l\Delta T\frac{\Delta X}{X},$$

где E — модуль упругости материала конструкции; α_l — коэффициент линейного расширения материала конструкции; ΔT — перепад температуры; ΔX — абсолютная деформация конструкции; X — исходный размер.

Использование этой модели позволило установить, что после 800 с работы рейки подвижных балок удлиняются относительно неподвижной опоры на 7 мм и на 21 мм относительно подвижной и увеличиваются по высоте на 1 мм с прогибом в средней части, что создает в местах контакта с заготовками эквивалентные напряжения 100...225 МПа (рис. 11). Дальнейший нагрев реек может привести к потере их продольной устойчивости и вызвать нарушение траектории движения и кантовки заготовок.

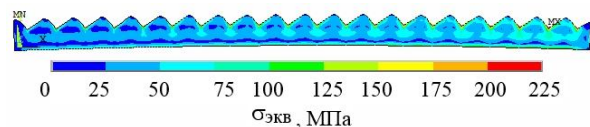


Рисунок 11 Эквивалентные напряжения в рейке последней секции

Полученная с помощью математических моделей кинематики движения, силового и теплового нагружения, прочностного анализа информация используется в *моделях развития неисправностей* элементов холодильника в качестве граничных критериев работоспособного состояния.

Модель развития неисправности представляет собой логическую последовательность условий и событий, реализация которых приводит к возникновению ана-

лизируемого нежелательного события. Например, развитие повреждений, связанных с ослаблением резьбовых соединений гидроцилиндров горизонтального перемещения, разрушением подвижных реек, износом плит трения и др.

Таким образом, разработанный комплекс математических моделей позволяет

представить поведение объекта холодильника МНЛЗ в проектных условиях функционирования, при развитии повреждений и потере работоспособности и обеспечивает получение информации, необходимой для реализации риск-ориентированного технического обслуживания и ремонта.

Библиографический список

1. Белодеденко, С. В. Методы количественного риск-анализа и безопасность механических систем [Текст] / С. В. Белодеденко, Г. Н. Биличенко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2015. — № 7. — С. 2–9.
2. Вишневский, Д. А. Компьютерная программа для расчета надёжности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли [Текст] / Д. А. Вишневский // *Инновационные перспективы Донбасса. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов*. — Донецк : ДонНТУ, 2018. — С. 114–119.
3. Савельев, А. Н. Оценка режима восстановления оборудования технологической линии «машина непрерывного литья заготовок» [Текст] / А. Н. Савельев, С. С. Северьянов, М. И. Тарасов // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. — 2016. — № 4 (18). — С. 36–40.
4. ГОСТ Р 51901–2002. Управление надёжностью. Анализ риска технологических систем [Текст]. — Введ. 2003–01–03. — М. : Стандартинформ, 2003. — 24 с.
5. ГОСТ Р 51901.1–2002 (МЭК 60300-3-9:1995). Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем [Текст]. — Введ. 2009–01–04. — М. : Стандартинформ, 2003. — 36 с.
6. ГОСТ Р 51901.5–2005 (МЭК 60300-3-1:2003). Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надёжности [Текст]. — Введ. 2005–01–02. — М. : Стандартинформ, 2005. — 45 с.
7. ГОСТ Р 51901.11–2005 (МЭК 61882:2001). Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство [Текст]. — Введ. 2005–01–06. — М. : Стандартинформ, 2005. — 42 с.
8. ГОСТ Р 51901.13–2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей [Текст]. — Введ. 2005–01–06. — М. : Стандартинформ, 2005. — 12 с.
9. ГОСТ Р 51901.14–2005 (МЭК 61078:1991). Менеджмент риска. Метод структурной схемы надёжности [Текст]. — Введ. 2005–01–07. — М. : Стандартинформ, 2005. — 18 с.
10. ГОСТ Р 51901.15–2005 (МЭК 61165:1995). Менеджмент риска. Применение марковских процессов [Текст]. — Введ. 2005–01–06. — М. : Стандартинформ, 2005. — 18 с.
11. Сидоров, В. А. Разработка математического описания для расчета траектории движения подвижных балок холодильника МНЛЗ [Текст] / В. А. Сидоров, Е. В. Ошовская, Ю. А. Шамрай // *Донбасс будущего глазами молодых ученых*. — Донецк : ДонНТУ, 2017. — С. 82–88.
12. Сидоров, В. А. Математическая модель для определения траекторий движения контрольных точек холодильника МНЛЗ [Текст] / В. А. Сидоров, Е. В. Ошовская, Ю. А. Шамрай // *Технологические машины и оборудование : материалы XVI Республиканской научно-технической студенческой конференции*. — Донецк : ДонНТУ, 2017. — С. 28–37.
13. Дятлов, А. Ю. Зависимости силового нагружения в работе механизма с шагающими балками сортовой МНЛЗ [Текст] / А. Ю. Дятлов, Е. В. Ошовская, В. А. Сидоров // *Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сб. тезисов докл. VI междунар. науч.-тех. конф. ; под общ. ред. В. А. Козачишена*. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. — С. 20–22.

© Шамрай Ю. А.

© Ошовская Е. В.

© Сидоров В. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневским Д. А.,
д.т.н., доц., зав. каф. управления качеством ДонНТУ Ченцовым Н. А.*

Статья поступила в редакцию 24.01.2022.

Shamray Yu. A., PhD in Engineering Oshovskaya E. V., Doctor of Technical Sciences

Sidorov V. A. (*DonNTU, Donetsk, DPR, joukserin@gmail.com*)

**MATHEMATICAL MODELS AS A SOURCE OF INFORMATION FOR A RISK-ORIENTED
MAINTENANCE OF THE CCM COOLER**

The paper presents a set of mathematical models required to the development of damage models as an information basis for a risk-oriented maintenance strategy. The models of power and thermal effects on the elements of mechanism have been developed for a cooler with walking beams of a billet continuous casting machine, the kinematics of movable racks motion and a canted ingot have been considered.

Key words: *mathematical modeling, risk-oriented strategy, the CCM cooler, motion path, temperature field, deformations, stresses.*