

Ю.А. Шамрай, Е.В. Ошовская /к.т.н./, В.А. Сидоров /д.т.н./  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ХОЛОДИЛЬНИКА С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ СОРТОВОЙ МНЛЗ

***Аннотация.** Холодильник с шагающими балками и гидравлическим приводом реек реализует в технологическом цикле работы сортовой машины непрерывного литья заготовок процесс охлаждения непрерывно-литой заготовки от температуры 800...900°C до температуры около 200°C, позволяющей реализовать операцию упаковки. Безотказность элементов холодильника определяет непрерывность технологического цикла всего сталеплавильного комплекса мини-металлургического завода. Одним из основных факторов, определяющих процессы физического старения деталей металлургических машин является тепловое воздействие. При этом работы, связанные с моделированием температурных процессов получения непрерывно-литой заготовки обычно связаны с последовательностью формирования заготовки. В работе, на основании классических подходов математического моделирования, определены температурные поля элементов конструкции холодильника и определены действующие тепловые нагрузки. Неравномерное распределение температур по зонам холодильника определяет различные сроки проведения операций по техническому обслуживанию и ремонту. Результаты измерения температуры в производственных условиях подтвердили адекватность разработанных моделей.*

***Ключевые слова:** математическое моделирование, тепловые поля, непрерывно литая заготовка, холодильник с шагающими балками, рейки, гидравлические цилиндры.*

### Введение

Одним из отличительных признаков металлургических машин является контакт с расплавленным или раскалённым металлом. Математическое моделирование тепловых металлургических процессов традиционно выполняется для оптимизации циклов нагрева перед ковкой [1], влияния на процессы кристаллизации [2...4], термостатирования и образование дефектов непрерывно-литого сляка МНЛЗ [5,6]. Математическое моделирование тепловых процессов непрерывно-литой заготовки выполняется относительно процессов формирования заготовки в зонах первичного и вторичного охлаждения [7...13]. Относительно механизмов с шагающими балками известны работы по моделированию нагрева металла в нагревательной печи [14...16]. В данных работах присутствуют подходы, ставшие классическими при моделировании тепловых процессов [17...19]. Это позволяет построить математические модели, позволяющие оценить влияние непрерывно-литой заготовки на элементы холодильника сортовой МНЛЗ.

Тепловое воздействие литых заготовок является основным фактором внешнего воздействия на элементы реечного холодильника с шагающими балками сортовой машины непрерывного

литья заготовок (МНЛЗ) [20,21]. Среди подсистем данной машины (электрической, механической, гидравлической, системы управления) наибольшее влияние на техническое состояние тепловое воздействие оказывает на рейки и гидравлические цилиндры привода горизонтального и вертикального перемещения. Это было определено после проведения анализа отказов гидроцилиндров холодильника МНЛЗ за 20-тилетний период эксплуатации - выявлена тенденция, связанная с преобладанием отказов гидроцилиндров, расположенных на «горячей» стороне холодильника [22,23]. Данный факт потребовал изучения характера теплового нагружения элементов конструкции холодильника, что было выполнено с помощью математического моделирования температурных полей и измерений температур реального объекта в производственных условиях. Полученные данные могут быть использованы при разработке алгоритмов диагностирования [24], стратегий технического обслуживания, определении сроков и объёмов ремонта [25].

### Исходные данные для математического моделирования

Заготовки, перемещаемые холодильником, оказывают силовое и тепловое воздействие на

элементы конструкции холодильника. При перемещении и кантовании заготовки охлаждаются за счёт излучения, конвекции и теплопроводности. Рабочий цикл определяет три варианта теплового нагружения:

1) начальный («загрузочный») – заготовки по одной поступают на холодильник и последовательно заполняют секции, добавляя тепловую нагрузку на элементы конструкции и вызывая перераспределение в них температуры;

2) основной – все секции холодильника заполнены заготовками, добавление и удаление очередной заготовки соответствует постоянной нагрузке;

3) заключительный – остывшие заготовки по одной выгружаются с холодильника и последовательно покидают секции, уменьшая тепловую нагрузку и вызывая перераспределение в них температуры.

Для выполнения математического моделирования в конструкции холодильника выделены: рейки подвижных балок и гидроцилиндры. Математическое описание температурного поля каждого из элементов конструкции представлено в виде уравнения теплопроводности, определяющего значение температуры в любой точке конструкции в произвольный момент времени:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = - \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right), \quad (1)$$

где  $T=f(x,y,z,t)$  – температура произвольной точки  $(x,y,z)$  конструкции;  $t$  – время;  $\lambda$  – теплопроводность материала объекта;  $c$  – теплоёмкость материала объекта;  $\rho$  – плотность материала объекта.

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 задавались в виде начальной температуры в каждой точке рассматриваемого объекта

$$T|_{t=0} = T_0(x, y, z). \quad (2)$$

Граничные условия соответствовали условиям II и III рода. Граничное условие II рода представлялось плотностью теплового потока на поверхностях элементов конструкций как функции координат точек поверхности и времени:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_S = q_S = \psi(x, y, z, t), \quad x, y, z \in S, \quad (3)$$

где  $n$  – внутренняя нормаль к поверхности  $S$ .

Плотность теплового потока на облучаемые поверхности объектов определялась по закону Стефана-Больцмана:

$$q_{л} = \Phi_{1-2} \varepsilon_{пр} C_0 \left[ \left( \frac{T_{заг}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_S}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где  $\Phi_{1-2}$  – угловой коэффициент излучения;  $\varepsilon_{пр}$  – приведенная степень черноты между поверхностями заготовки и тела;  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела;  $T_{заг}$  – температура поверхности заготовки, °К;  $T_S$  – температура поверхности объекта, °К.

Данный поток создается нагретой заготовкой и является переменным по времени и длине холодильника. Угловые коэффициенты излучения  $\Phi_{1-2}$  определены по формулам [3.1,3.2]. Графики изменения угловых коэффициентов в

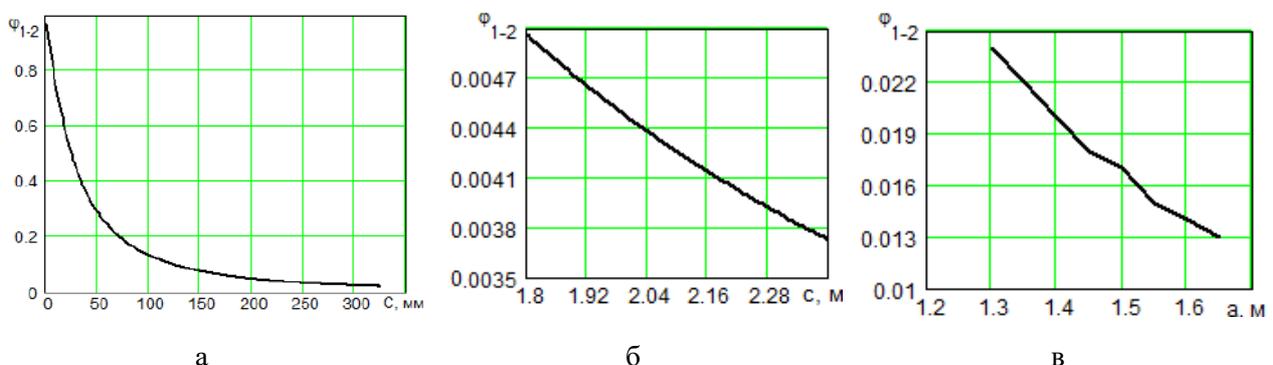


Рис. 1. Графики изменения угловых коэффициентов  $\Phi_{1-2}$  при расчете плотности теплового потока для реек подвижных балок (а); гидроцилиндра вертикального перемещения (б) и гидроцилиндра горизонтального излучения (в)

зависимости от расстояния до поверхности заготовки приведены на рис. 1.

Приведенная степень черноты  $\varepsilon_{пр}$  между поверхностями заготовки и рассматриваемых элементов конструкции тела учитывала отсутствие или наличие защитных экранов и определена по формулам [3.1]:

– для реек подвижных балок (экран отсутствует):

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon} ; \quad (5)$$

– для гидроцилиндров (наличие экрана):

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\varepsilon}{4 - 2\varepsilon} , \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты стальных конструкций, принято  $\varepsilon=0,7$  [3.3].

Граничное условие III рода задавалось на поверхностях исследуемых объектов, соприкасающихся с воздушной средой, и представлено плотностью теплового потока, которая определяется в соответствии с законом Ньютона

$$q_s = \pm \alpha (T_s - T_c) , \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_s$  – температура поверхности;  $T_c$  – температура среды.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  также является переменным. Его значения определены по критериальным соотношениям с учётом режима движения воздушной среды. Для гидроцилиндров вертикального перемещения, расположенных на «холодной» стороне холодильника и для боковых поверхностей реек использованы критериальные соотношения теплоотдачи при естественной конвекции воздуха:

$$\alpha = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_{в}}{H} , \quad (8)$$

где  $\lambda_{в}$  – теплопроводность воздуха при температуре рабочей зоны гидропривода;  $H$  – высота гидроцилиндра (высота рейки);  $\overline{Nu}$  – число Нуссельта, вычисляемое при турбулентном режиме движения ( $Gr \cdot Pr > 10^9$ ) по выражению [3.1]:

$$\overline{Nu} = 0,0246 (Gr \cdot Pr)^{0,4} \cdot \left( \frac{Pr^{1/6}}{1 + 0,494 Pr^{2/3}} \right)^{0,4} , \quad (9)$$

где  $Gr$  – число Грасгофа;  $Pr$  – число Прандтля.

Для гидроцилиндра горизонтального перемещения использованы критериальные соотношения для теплоотдачи при естественной конвекции воздуха [3.1]:

$$\alpha = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_{в}}{D} , \quad (10)$$

$$\overline{Nu} = 0,1 (Gr \cdot Pr)^{1/3} , \quad (11)$$

где  $D$  – внешний диаметр гидроцилиндра.

Для гидроцилиндров вертикального перемещения, расположенных на «горячей» стороне холодильника, использованы критериальные соотношения для теплоотдачи при вынужденной конвекции воздуха, т.к. на этом участке цеха установлена система аэрации [3.1]:

$$\alpha = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_{в}}{D} , \quad (12)$$

$$\overline{Nu} = 0,148 Re^{0,633} , \quad (13)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса, зависящее от скорости воздуха в зоне обдува.

### Математическое моделирование температурных полей

На основании формул (8) и (10) определены закономерности изменения коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции в зависимости от температуры элементов конструкции. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции составил  $70 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ .

В процессе перемещения заготовок подвижные элементы конструкции двигаются по замкнутой траектории, на которой можно выделить 6 участков, отличающихся тепловой нагрузкой. Вначале происходит подъём подвижных балок с рейками к заготовкам, которые находятся на рейках неподвижных балок.

Участок 2 – заготовки переходят на рейки подвижных балок, подъём заготовок вертикальными цилиндрами продолжается, образуется контакт поверхностей заготовок и выступов на рейках. На участке 3 подвижные балки с заготовки перемещаются в горизонтальном направлении, контакт заготовок с рейками подвижных балок сохраняется. Далее на участке 4 выполняется опускание подвижных балок и заготовок – заготовки снова оказываются на рейках неподвижных балок. Подвижные балки с рейками продолжают движение вниз – участок 5 – с помощью цилиндров вертикального перемещения. На участке 6

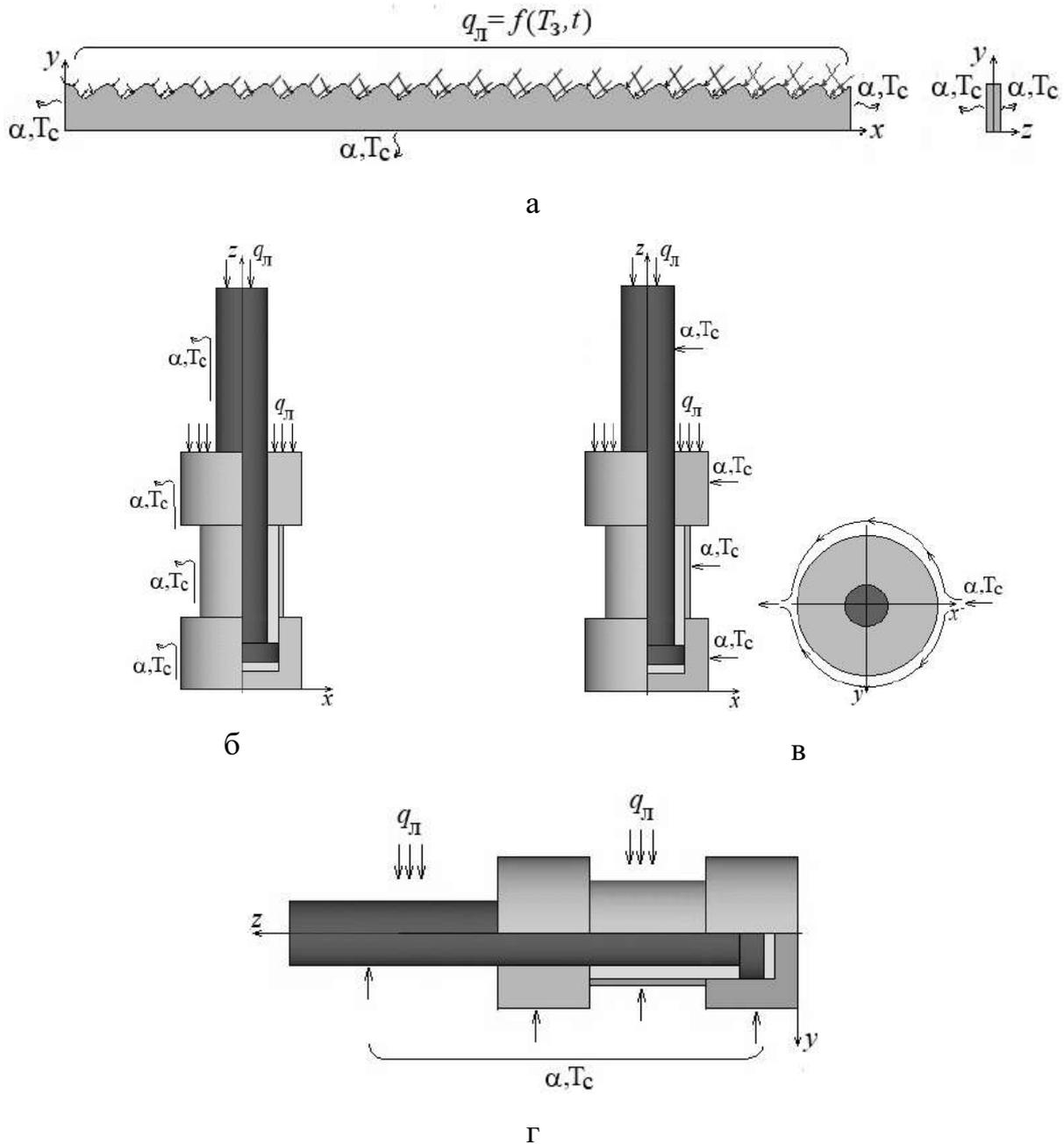


Рис. 2. Расчётные схемы для математической модели температурных полей рейки подвижной балки (а), гидроцилиндра вертикального перемещения, установленного на «холодной» (б) и «горячей» (в) стороне холодильника, гидроцилиндра горизонтального перемещения (г)

происходит возврат в исходное положение посредством цилиндров горизонтального перемещения. Такой характер движения приводит к тому, что плотности тепловых потоков, связанных с излучением заготовок, изменяются по пульсирующему закону в процессе перемещения и кантовки заготовки, что является значимым для реек. Это позволило получить зависимости изменения плотности теплового потока, поступающего от поверхностей заготовок на поверхности выступов реек подвижной балки, за один цикл кантовки.

Расчётные схемы для математических моделей температурных полей исследуемых объектов с приложением граничных условий приведены на рис. 2, рассматривается основной этап работы холодильника – полная загрузка заготовками.

Реализация математических моделей и последующее математическое моделирование выполнено в прикладном пакете ANSYS, в котором решение уравнения теплопроводности (1) реализуется методом конечных элементов. Для этого были созданы геометрические и конечно-элементные модели исследуемых объектов (рис. 2),

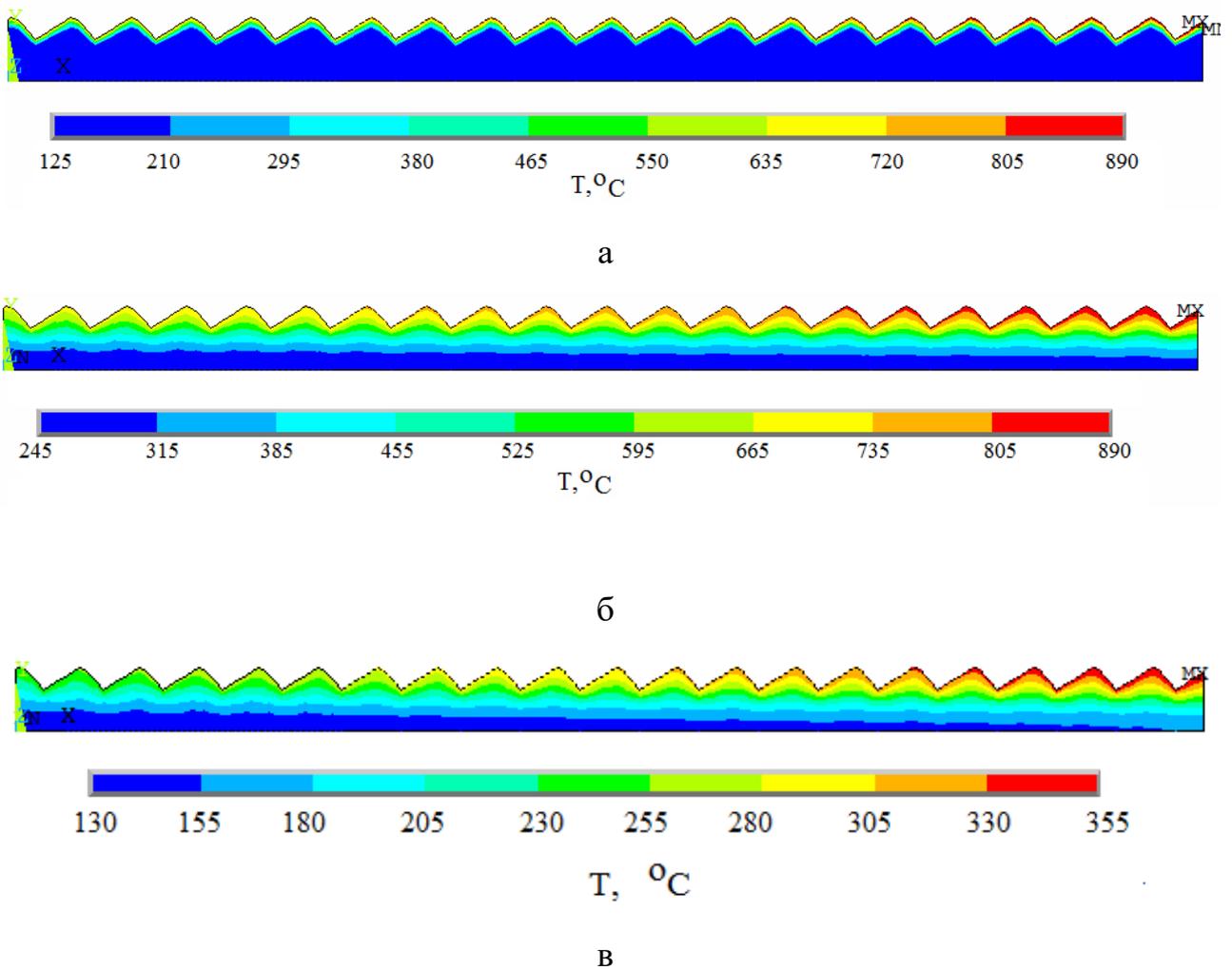


Рис. 3. Поля температуры, возникающие в рейке подвижной балки, через 8 с (а) и 800 с (б, в) работы холодильника (б – первая секция, в – последняя секция холодильника)

учитывающие теплофизические свойства материалов. На соответствующих поверхностях заданы начальные и граничные условия.

Результаты математического моделирования представлены картинками распределения температуры в исследуемом элементе конструкции в различные моменты времени, а также графиками изменения температуры в указанной точке конструкции или сечении. На рис. 3 показаны поля температуры, возникающие в рейке подвижной балки через 8 и 800 с работы холодильника при полной загрузке заготовками. Распределение температуры неравномерное по длине (перепад температур – 50...100°C) и по высоте рейки (перепад температур – 400...600°C).

При моделировании теплового нагружения рейки последней секции холодильника (рис. 3в) установлено различие в уровне температурных полей. Так, через 800 с работы холодильника диапазон температур рейки составляет 130...355°C,

что ниже 2...3 раза, чем на рейке первой секции (рис. 3б).

Температурные поля гидроцилиндров вертикального перемещения, расположенных с «горячей» и «холодной» стороны холодильника, также имеют различия, как в качественной картине, так и в количественном выражении (рис. 4). Разница температур в средней части корпусов гидроцилиндров, после 24 часов работы, составляет около 20...25°C. При этом температура рабочей жидкости практически совпадает с температурой корпуса цилиндра – 50...70°C.

Распределение температур для горизонтального цилиндра отличается и по характеру, и по значениям. Перепад температур между верхней и нижней поверхностями после 24 часов работы составляет 90°C. Температура рабочей жидкости 100...180°C. Для гидроцилиндра, расположенного в хвостовой части холодильника, расчётные температуры ниже на 120...130°C.

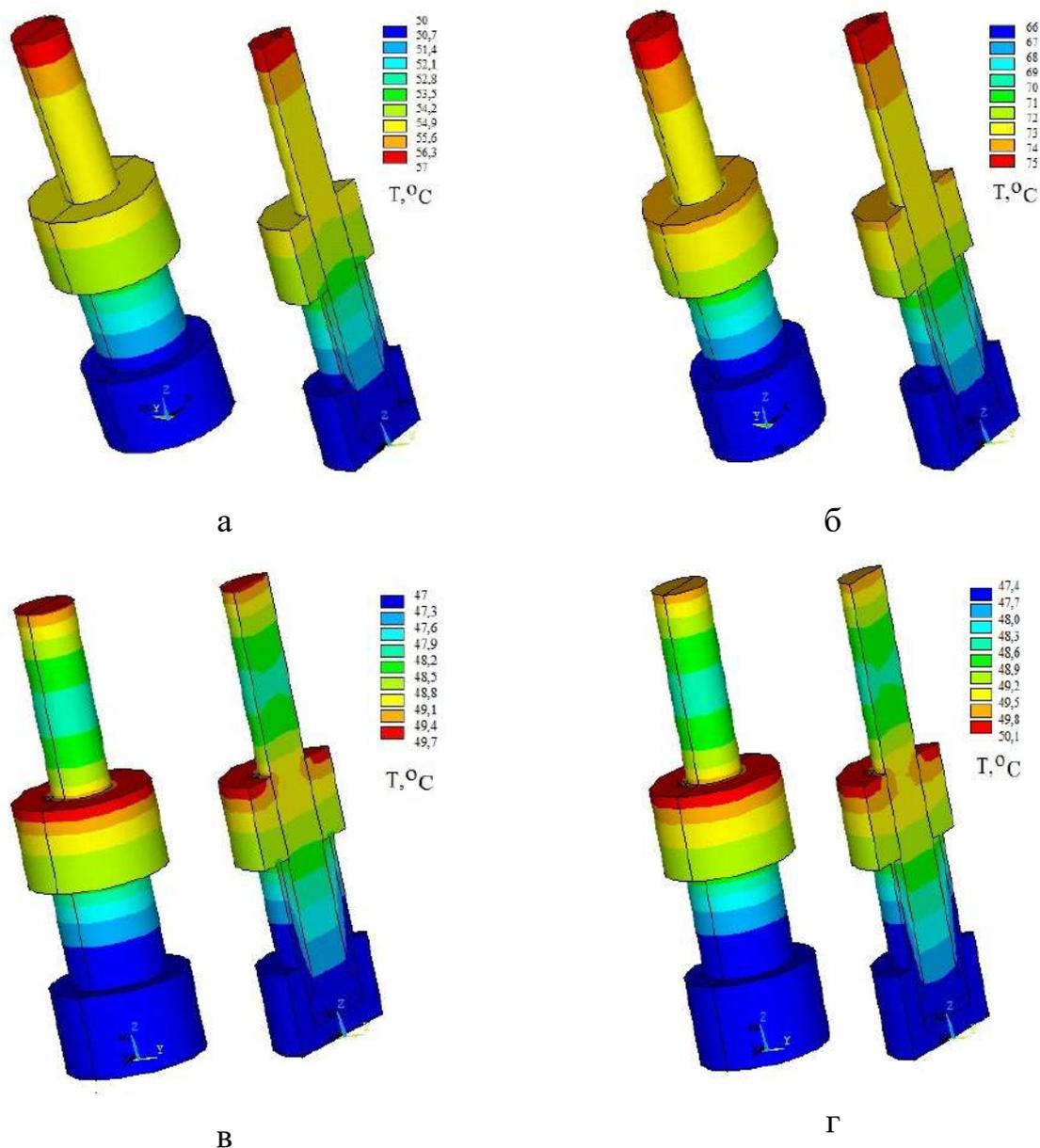


Рис. 4. Температурные поля гидроцилиндров вертикального перемещения, расположенных с «горячей» (а, б) и «холодной» (в, г) стороны холодильника через 4 (а, в) и 24 (б, г) часа работы

**Измерение температур элементов в производственных условиях**

Проверка правильности результатов моделирования выполнена в производственных условиях. Измерения проводилось при помощи тепловизоров-пирометров FLIR TG165 и FLIR C2 через 4 часа, после начала работы. Термограммы, полученные при обследовании элементов холодильника, указывают:

- на различия в температуре реек по длине – 317...350°C (вначале) и 200...210°C перед сталкивателем на рольганг к пакетировщику;
- на различия в температуре реек по сторонам холодильника – 200...350°C (правая сторона) и 210...317°C (левая сторона);

– на различия в температуре гидроцилиндров вертикального перемещения – 83...87°C (вначале) и 51...63°C перед сталкивателем на рольганг к пакетировщику.

**Выводы**

1. Математические модели температурных полей элементов конструкции холодильника позволили определить тепловые нагрузки, действующие на них.
2. Результаты моделирования показали неравномерное распределение температурного поля в конструкции и расположении элементов.
3. Однотипные элементы (гидроцилиндры, рейки), расположенные в разных частях

холодильника имеют температурные различия, что необходимо учитывать при планировании их технического обслуживания и ремонтов.

4. Результаты измерения температуры в производственных условиях показали необходимость учёта индивидуальных особенностей конструкции – расположение системы аэрации, положения холодильника относительно пролётов цеха и др.

### Список литературы

- Romano-Acosta, L.F. Optimization of Heating Cycles Prior Forging for Large Steel Ingots Based on a Simulation Model. *Mater. Perform. Charact.* 2018, 7, 33–48. [CrossRef].
- Kesavan, V., Srinivasan, M. & Ramasamy, P. The Influence of Multiple-Heaters on the Reduction of Impurities in mc-Si for Directional Solidification. *Silicon* 11, 1335–1344 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12633-018-9928-7>
- Assunção, C.S., Tavares, R.P., & Oliveira, G.D. (2014). Water distribution assessment applied to mathematical model of continuous casting of steel. *Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM)*, 3, 2895–2905. <https://doi.org/10.5151/1982-9345-26252>.
- Bobadilla, M., Jolivet, J.M., Lamant, J.Y., & Larrecq, M. (1993). Continuous casting of steel: a close connection between solidification studies and industrial process development. *Materials Science and Engineering A*, 173(1–2), 275–285. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(93\)90229-8](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90229-8).
- Демиденко, Л.Л. Термостатирование непрерывно-литого слитка в МНЛЗ для обеспечения прямой прокатки / Л.Л. Демиденко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т.18, №2. – С. 100-106. DOI: 10.14529/теШ0212
- Daniela Fátima Gomes, Bernardo Martins Braga, Roberto Parreiras Tavares, Maurício Covcevic Bagatini Mathematical modelling of the continuous casting of blooms and beam blanks / *COMPUTER METHODS IN MATERIALS SCIENCE* 2021, vol.21, no.3, 149–156 <https://doi.org/10.7494/cmms.2021.3.0735>
- Краюшкин Н.А., Прибытков И.А., Шатохин К.С. Исследование влияния неоднородности граничных условий на интенсивность охлаждения цилиндрических заготовок в МНЛЗ // Изв. Вузов. Чёрная металлургия. – 2016. – №9. – С. 650-655.
- Бирюков А.Б., Иванова А.А. Рациональные параметры тепловой работы зоны вторичного охлаждения слябовых МНЛЗ / «СТАЛЬ», №2. 2015. С. 18-21.
- Тырин Д.Ю., Сараев П.В., Галкин А.В., Пименов В.А. Компьютерное моделирование охлаждения стального слитка в УНРС / материалы конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ» Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Том 10 Год: 2019. С. 34-38.
- Бирюков А. Б., Иванова А.А. Рациональное распределение интенсивности охлаждения поверхности круглой непрерывнолитой заготовки в зоне вторичного охлаждения / «МЕТАЛЛУРГ» №12. 2020. С. 71-75
- Стальной слиток. Т. 2: Затвердевание и охлаждение / Ю.А. Самойлович и др. – Минск: Белорусская наука, 2000. – 640 с.
- Ivanova A.A. Criteria of the quality of the temperature field of a continuous-cast ingot // *Metallurgist*. 2012. Vol.55. №9-10. P. 710-719
- Ivanova A.A. Predictive control of water discharge in the secondary cooling zone of a continuous caster // *Metallurgist*. 2013. Vol.57. №7. P. 592-599
- Loshkarev N. B., Noskov V. A., Druyhinin G. M. Mathematical Model of Metal Heating in the Continuous Walking Beam Reheating Furnace. July 2018 *KnE Engineering* 3(5):287. DOI:10.18502 / keg.v3i5.2681
- Alex, M.G.; Andres, F.C.; Julian, E.O.; Carlos, E.A.; Andres, A.A. Effect of the burner position on an austenitizing process in a walking-beamtype reheating furnace. *Appl. Therm. Eng.* 2019, 153, 633–645
- Jingyu Wang, Guojun Li, Linyang Wei, Zhi Yi, Xiaodong Wang. Investigation on thermal characteristics of walking reheating furnace for beam blank // *International Communications in Heat and Mass Transfer* / Volume 128, November 2021, 105646 <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105646> Get r
- Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
- Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
- Металлургическая теплотехника. В 2-х томах. Т.1. Теоретические основы: Учебник для вузов / Кривандин В.А., Арутюнов В.А., Мاستрюков Б.С. и др. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
- Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штелан Е.В. Непрерывная разливка стали. – Донецк: ДонГТУ, 2011. – 482 с.
- Бирюков А. Б. Совершенствование теплотехнических параметров систем производства

- непрерывно-литой заготовки и её тепловой обработки. – Донецк: изд-во «Ноулидж», 2013. – 471 с.
22. Сидоров В.А. Информативность анализа отказов при управлении рисками внеплановых простоев холодильника МНЛЗ / В. А. Сидоров, Е. В. Ошовская, Ю. А. Шамрай // Научный прогресс в черной металлургии [Электронный ресурс]: материалы 4-й Международно-практической конференции, 18–20 сентября 2019 г., г. Череповец. – Череповец: Череповецкий государственный университет., 2019. – С. 63-70.
23. Сидоров В.А. Анализ отказов гидропривода холодильника МНЛЗ / В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская, Ю.А. Шамрай // Механика жидкостей и газов [Электронный ресурс]: материалы XV Международной конференции, 29 ноября 2016 г., г. Донецк: ДонНТУ, 2016. – С. 13-19.
24. Сидоров В.А. Разработка алгоритма диагностирования гидропривода холодильника МНЛЗ / В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская, Ю.А. Шамрай // Инновационные перспективы Донбасса [Электронный ресурс]: материалы 4-й Международной научно-практической конференции, 22–25 мая 2018 г., г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – 2018. – С. 171-181.
25. 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.

**Yu.A. Shamray, E.V. Oshovskaya /Cand. Sci. (Eng.), V.A. Sidorov /Dr. Sci. (Eng.)/**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

### MATHEMATICAL MODELING TEMPERATURE FIELDS OF THE REFRIGERATOR WITH WALKING BEAMS OF VARIETAL CCM

**Annotation.** *A refrigerator with walking beams and a hydraulic drive rack implements in the technological cycle of the varietal machine of continuous casting of blanks the process of cooling the continuously cast billet from a temperature of 800...900°C to a temperature of about 200°C allowing to realize the operation of packaging. The reliability of the refrigerator elements determines the continuity of the technological cycle of the entire steelmaking complex of the mini-metallurgical plant. One of the main factors determining the processes of physical aging of parts of metallurgical machines is the thermal effect. At the same time, the work associated with modeling the temperature processes of obtaining a continuously cast workpiece is usually associated with the sequence of forming the workpiece. In the work, based on classical approaches of mathematical modeling, the temperature fields of the refrigerator structural elements are determined and the effective thermal loads are determined. Uneven temperature distribution across refrigerator zones.*

**Keywords:** *mathematical modeling, thermal fields, continuous cast billet, refrigerator with walking beams, rails, hydraulic cylinders.*

**Сведения об авторах**

**Ю.А. Шамрай**

SPIN-код: 3313-1194  
 Телефон: +7 (949)381-74-16  
 Эл. почта: joukserin@gmail.com

**В.А. Сидоров**

SPIN-код: 2618-4815  
 Телефон: +7 (949)312-79-13  
 Эл. почта: sidorov\_va58@mail.ru

**Е.В. Ошовская**

SPIN-код: 6249-3730  
 Телефон: +7 (949)358-53-34  
 Эл. почта: evo2008@bk.ru

*Статья поступила 10.03.2022 г.  
 © Ю.А. Шамрай, Е.В. Ошовская, В.А. Сидоров, 2022  
 Рецензент д.т.н., проф. Н.А. Ченцов*