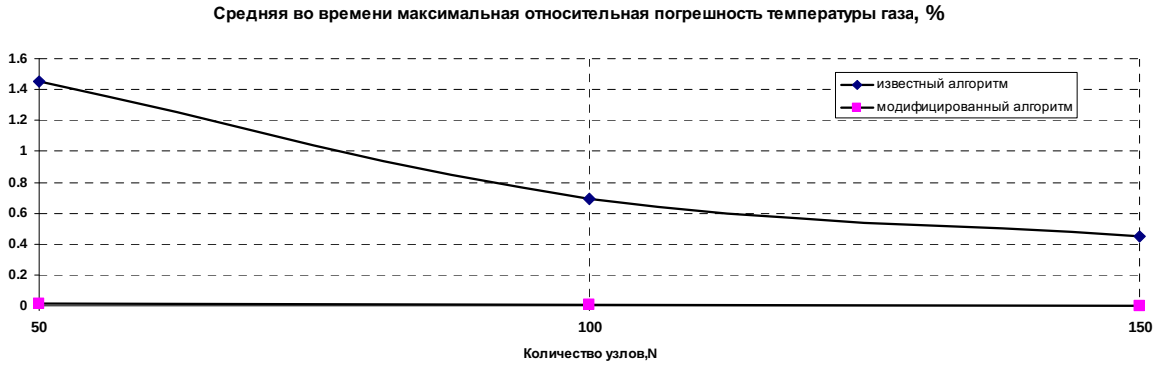
а)



б)

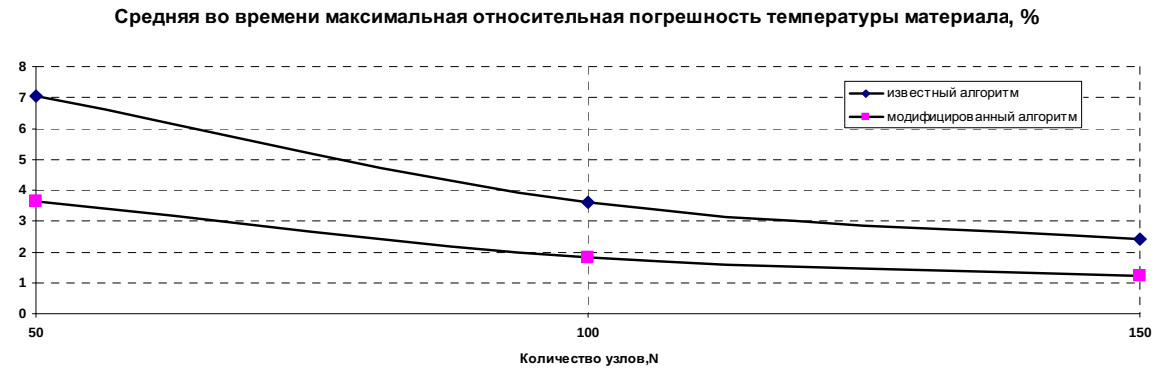


Рис. 4. Зависимость среднего во времени значения максимальной относительной погрешности расчета температур газа и материала по слою от количества узлов *N* для известного алгоритма (*а*) и для модифицированного алгоритма (*б*)

Литература

1. *Гордон, Я.М.* Характер работы компактного слоевого регенератора при переменных характеристиках теплоносителя / Я.М. Гордон, В.А. Гурашвилли, М.В. Раева // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1987. – № 2. – С. 84 – 86.

2. *Елисеев, А.А.* Исследование тепломассообменных процессов при агломерации шихты: дис. … канд. тех. наук / А.А. Елисеев. – Череповец, 2006.

3. *Михеев, М.А.* Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.,1977.

4. *Соломнцев, С.Л.* Математическая модель теплообмена в насадке воздухонагревателя / С.Л. Соломнцев, В.Д. Коршиков, С.М. Барсукинский // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1985. – № 7. – С. 142 – 144.

5. *Телегин, А.С.* Тепломассоперенос / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М., 1995.

6. *Тимофеев, В.Н.* Расчет температурных полей в слое с учетом продольной теплопроводности / В.Н. Тимофеев, М.В. Раева, Ф.Р. Шкляр // Нагрев и охлаждение стали. Теплотехника слоевых процессов: Сб. науч. тр. ВНИИМТ. – М., 1970. – № 23. – С. 174 – 180.

7. *Шкляр, Ф.Р.* Прогрев слоя газом с движущимся фронтом постоянной температуры / Ф.Р. Шкляр, Н.М. Бабушкин, В.Н. Тимофеев // Теплотехника доменного и агломерационного процессов: Сб. науч. тр. ВНИИМТ. – М., 1966. – № 14. – С. 172 – 189.

УДК 681.324

Д.В. Кочкин, А.А. Суконщиков

НЕЧЕТКИЙ ВЫВОД НА БАЗЕ АППАРАТА МОДИФИЦИРОВАННЫХ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Развитие информационных технологий требует совершенствования методов моделирования и применяемых математических аппаратов. Аппарат сетей Петри применяется для моделирования параллельных асинхронных систем и имеет широкую область применения. Модифицированное расширение может быть использовано для построения моделей со сложной структурой и логикой функционирования с применением аппарата нечеткой логики для управления на основе системы продукционных правил.

Нечеткое управление, нечеткий вывод, моделирование, сети Петри, расширения сетей Петри.

The development of information technologies requires the improvement of methods of simulation and mathematical apparatus. The mathematical apparatus of Petri nets is used for the simulation of parallel asynchronous systems and has a broad scope. Modified extension can be used to construct models with a complex structure and logic of operation with the use of the apparatus of fuzzy logic for control on the basis of the system of production rules.

Fuzzy control, fuzzy output, modeling, Petri nets, Petri nets extensions.

Моделирование производственных, технологических и бизнес-процессов является актуальной задачей, которая позволяет определить возможные риски, сократить издержки, а также модифицировать моделируемый процесс. Моделирование может быть применено при разработке системы управления некоторым процессом, а благодаря совмещению в рамках одной модели управляемого объекта и системы управления, может быть разработан алгоритм управления и определены параметры модели. Учитывая сложность современных систем и процессов, актуальными вопросами представляются разработка подходов к моделированию и развитие судействующих математических аппаратов.

Данная статья посвящена рассмотрению структуры и возможностей математического аппарата, модифицированных нечетких сетей Петри (МНСП), построенных на базе раскрашенных, нечетких, временных, приоритетных и иерархических сетей Петри (СП) (рис. 1). В статье рассматривается возможность построения системы нечеткого вывода на базе модифицированного расширения, приводятся модели некоторых этапов работы системы нечеткого вывода в виде модели на базе МНСП.

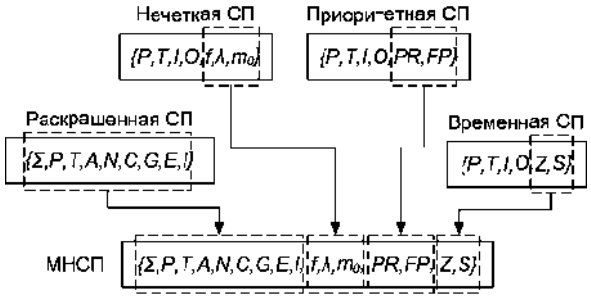


Рис. 1. Структура аппарата модифицированного расширения СП

С учетом определений введенных для базовых расширений математический аппарат МНСП может быть представлен следующим образом:

$$MPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I, f, \lambda, m_0, PR, FP, Z, S),$$

где Σ – конечное множество типов; P – конечное множество позиций, такое что $P = P_c \cup P_f$, где P_c – конечное множество позиций РСП, P_f – конечное множество позиций НСП, при этом $P_c \cap P_f = \varnothing$; T – конечное множество переходов, такое что $T = T_c \cup T_f \cup T_{cf} \cup T_{fc}$, где T_c – конечное множество переходов РСП, T_f – конечное множество переходов НСП, T_{cf} – конечное множество переходов из позиций РСП в позиции НСП T_{fc} – конечное множество переходов из позиций НСП в позиции РСП, при этом множества T_c, T_f, T_{cf}, T_{fc} являются попарно непересекающимися; A – конечное множество дуг; N – функция инцидентности $N: A \to A_c \cup A_f \cup A_{cf} \cup A_{fc}$, $A_c = P_c \times T_c \cup T_c \times P_c$, $A_f = P_f \times T_f \cup T_f \times P_f$, $A_{cf} = P_c \times T_{cf} \cup T_{cf} \times P_f$, $A_{fc} = P_f \times T_{fc} \cup T_{fc} \times P_c$; C – функция определения типа позиции $C: P_c \to \Sigma$; G – функция устанавливает каждому переходу охранные выражения, такие что $\forall t \in T_c : [\mathrm{Type}(G(t)) = \mathrm{B} \wedge \mathrm{Type}(Var(G(t))) \subseteq \Sigma]$; E – функция, которая сопоставляет каждой дуге выражение, такое, что $\forall a \in A_c : [\mathrm{Type}(E(a)) = C(p)_{ms} \wedge \mathrm{Type}(Var(E(a))) \subseteq \Sigma]$, p – инцидентная дуге позиция; I – функция инициализации (начальной маркировки), которая сопоставляет каждой позиции РСП тривиальное выражение, такое, что $\forall p \in P_c : [\mathrm{Type}(I(p)) = C(p)_{ms}]$; $f = (f_1, f_2, ..., f_n)$ – вектор значений функции принадлежности нечеткого срабатывания переходов $t_i \in T_f$ НСП, при этом $f_j \in [0,1](\forall j \in \{1,2,...,u\})$; $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n)$ – вектор значений порога срабатывания переходов $t_i \in T_f$ НСП, при этом $\lambda_i = [0,1](\forall j \in \{1,2,...,u\})$; $m_0 = (m_1^0, m_2^0, ..., m_n^0)$ – вектор начальной маркировки позиций $p_i \in P_f$ НСП, каждый компонент которого определяется значением функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующей позиции данной НСП Cf, при этом $m_i^0 \in [0,1](\forall i \in \{1,2,...,u\})$; PR – конечное множество приоритетов, определяющих порядок срабатывания переходов в случае наличия нескольких активных переходов; FP – функция сопоставляет каждому переходу приоритет срабатывания $FP: T \to PR$; Z – вектор параметров временных задержек маркеров в позициях $Z = (z_1, z_2, ..., z_n)$, $z_i \in N \cup \{0\}$; S – вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов $S = (s_1, s_2, ..., s_n)$, $s_i \in N \cup \{0\}$.

Выполнение моделей на базе модифицированного расширения определяется набором правил (правило определения текущей маркировки, правило определения активности перехода, правило срабатывания перехода), учитывающих наличие раскрашенных и

нечетких позиций и переходов. Рассмотрим правило срабатывания переходов более подробно.

Срабатывание некоторого активного перехода $t_k \in T_f$ НСП осуществляется мгновенным образом и приводит к новой текущей маркировке $mf^v = (mf_1^v, mf_2^v, ..., mf_n^v)$, компоненты вектора которой определяется по следующим формулам:

– для входных позиций $p_i \in P_f$, для которых $A(p_i, t_k) > 0$:

$$mf_i^v = 0, \qquad (\forall p_i \in P_f) \wedge (A(p_i, t_k)) > 0); \qquad (1)$$

– для выходных позиций $p_j \in P_f$, для которых $A(t_k, p_j) > 0$:

$$mf_j^v = \max\left\{ mf_j, \frac{\min\{mf_i, f_k\}}{(i \in \{1,2,...,n\}) \wedge (A(p_i, t_k) > 0)} \right\} \quad (\forall p_j \in P_f) \wedge (A(t_k, p_j) > 0), \qquad (2)$$

где f_k – значение функции принадлежности или мера возможности нечеткого срабатывания перехода $t_k \in T_f$. Если некоторые позиции $p_i \in P_f$ являются одновременно входными и выходными для некоторого разрешенного перехода $t_k \in T_f$, то вычисление компонентов вектора новой маркировки вычисляется последовательно, сначала по формуле (1), а затем – по формуле (2).

Срабатывание некоторого активного перехода $t_k \in T_c$ РСП осуществляется мгновенным образом и приводит к новой текущей маркировке $mc^v = (mc_1^v, mc_2^v, ..., mc_n^v)$, компоненты вектора которой определяется по следующим формулам:

– для входных позиций $p_i \in P_c$, для которых $A(p_i, t_k) > 0$:

$$mc_i^v = mc_i - E(p_i, t_k)(b) \ (\forall p_i \in P_c) \wedge (A(p_i, t_k) > 0) \qquad (3)$$

– для выходных позиций $p_j \in P_c$, для которых $A(t_k, p_j) > 0$:

$$mc_j^v = mc_j + E(t_k, p_j) \ (\forall p_j \in P_c) \wedge (A(t_k, p_j) > 0) \qquad (4)$$

где *b* есть некоторое означивание перехода $t_k \in T_c$. В случае, если некоторая позиция $p_i \in P_c$ является одновременно входной и выходной для перехода $t_k \in T_c$, то ее маркировка вычисляется последовательно: сначала по формуле (3), затем по формуле (4). Другими словами, срабатывание происходит в два этапа, сначала из входных позиций извлекаются метки, заданные на входящих дугах и участвующие в означивании перехода, а затем в выходные позиции помещаются метки, заданные на выходящих дугах.

В качестве среды для построения моделей на базе МНСП предлагается использовать программу CPN Tools. Использование CPN Tools предполагает преобразование нечетких позиций и переходов в раскрашенные. Благодаря наличию встроенного языка программирования CPN ML, CPN Tools представляет широкие возможности для моделирования сложных объектов и их внутренней логики.

Комбинирование свойств базовых расширений позволяет увеличить моделирующие возможности аппарата МНСП. В частности, применение меток сложного формата позволяет моделировать различные информационные потоки в модели. Благодаря возможности построения иерархических моделей, улучшается их наглядность. Использование охранных выражений и выражений на дугах позволяет программировать внутреннюю логику работы моделируемых объектов. Возможность задания временных задержек меткам и времени срабатывания переходам позволяет адекватно моделировать функционирование исследуемых объектов во времени.

Наличие нечетких позиций и переходов позволяет моделировать процесс нечеткого вывода и строить модели системы управления не базе нечетких продукционных правил в моделях МНСП.

Модели на базе аппарата МНСП могут быть использованы при моделировании технологических и бизнес-процессов, протоколов передачи данных, телекоммуникационного оборудования, вычислительных систем.

Аппарат нечетких СП применяется для моделирования этапов агрегирования подусловий и активации подзаключений процесса нечеткого вывода [1, с. 286]. Модифицированное расширение СП, благодаря комбинации свойств нечетких и раскрашенных СП, позволяет моделировать все этапы нечеткого вывода.

Фаззификация – процедура нахождения значений функций принадлежности термов входных переменных на основе их значений. Перед этапом фаззификации необходимо определить множества входных переменных $V = \{\beta_1, \beta_2, ..., \beta_m\} \mid m \in N$, множество значений входных переменных $V' = \{a_1, a_2, ..., a_m\} \mid m \in N$ и множество выходных переменных $W = \{w_1, w_2, ..., w_s\} \mid s \in N$. При этом $a_i \in X_i$, X_i – универсум лингвистической переменной β_i. Целью данного этапа является нахождения значений вектора $B = \{\beta_i'\} \mid \beta_i' = \mu(a_i)$. *B* – множество значений функции принадлежности всех термов каждой входной лингвистической переменной.

Процедура фаззификации термов некоторой входной переменной β_i на базе аппарата МНСП представлена на рис. 2 (*а*).

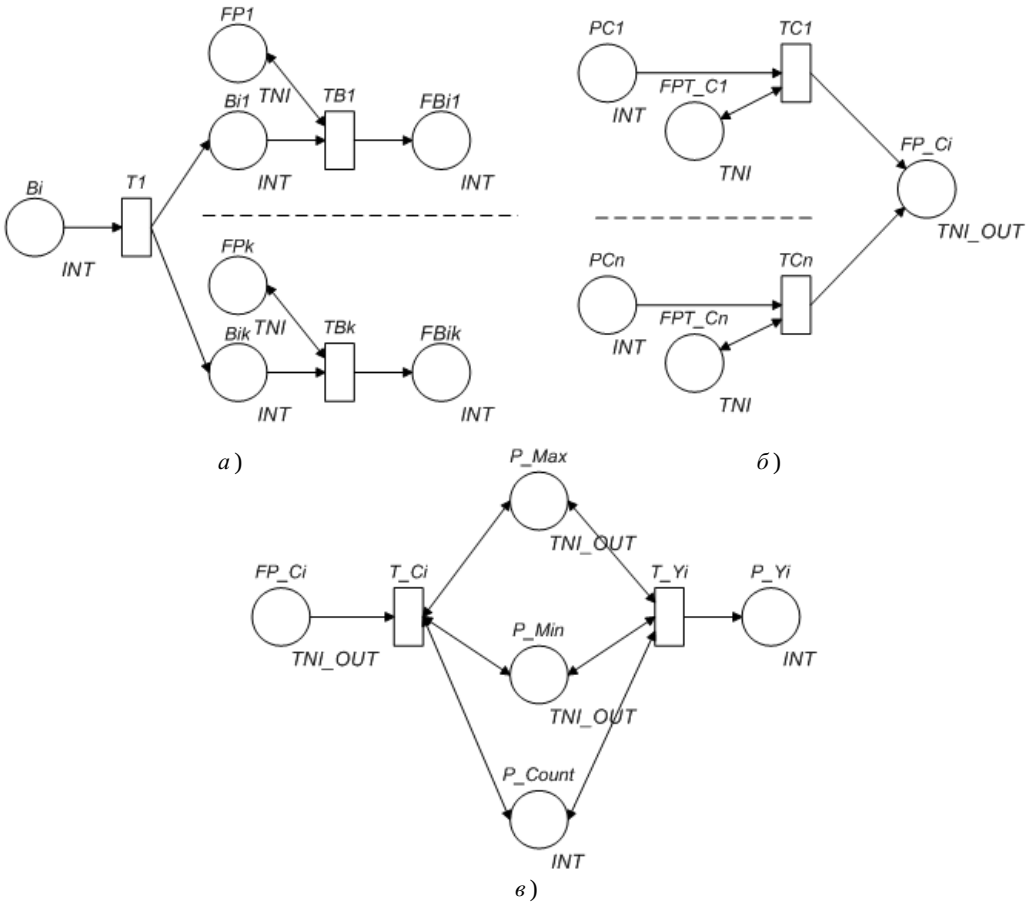


Рис. 2. Процедуры фаззификации (*а*), аккумуляции (*б*) и дефаззификации (*в*) на базе МНСП

Функция инициализации *I(p)* позиций $\{FP_1, FP_2, ..., FP_k\} \mid k \in N$ определяется в виде ТНИ.

Вектор значений $B = \{\beta_i '\}$, определяется маркировкой позиций $\{FBi_1, FBi_2, ..., FBi_k\} \mid k \in N$, как $B = \{\beta_i '\} \mid \beta_i ' = m(FBi_i)$.

Аккумуляция является процедурой нахождения функции принадлежности для каждой выходной лингвистической переменной $W = \{w_1, w_2, ..., w_s\} \mid s \in N$. Функция принадлежности выходной переменной состоит из функций принадлежности выходных заключений и подзаключений правил базы. Необходимость аккумуляции объясняется тем, что подзаключения, относящиеся к одной и той же выходной переменной, могут находиться в разных правилах. Процедура аккумуляции для некоторой выходной переменной w_i приведена на рисунке 2 (*б*).

Маркировка позиции *FP_Ci* представляет собой аккумулированное значение функции принадлежности выходной переменной w_i. Маркировка позиций $\{PC_1, ..., PC_n\} \mid n \in N$ представляет степени истинности отдельных подзаключений в выходных продукционных правилах. Маркировка позиций $\{FPT_C_1, ..., FPT_C_n\} \mid n \in N$ представляет собой функции принадлежности термов, некоторой выходной переменной w_i, входящей в различные подзаключения.

Аккумуляция осуществляется по формуле max-объединения нечетких множеств $\mu_c(x) = \max\{\mu_a(x), \mu_b(x)\}$ $(\forall x \in X)$, $\{PC_1, ..., PC_n\} \mid n \in N$.

Формально этап аккумуляции считается законченным, когда получены функции принадлежности всех выходных переменных с учетом всех подзаключений, относящихся к этим переменным.

Дефаззификация – это процедура нахождения обычного (не нечеткого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных $W = \{w_1, w_2, ..., w_s\} \mid s \in N$ на основе аккумулированных значений функции принадлежности. Получившиеся в ходе процедуры дефаззификации значения $Y = \{y_1, y_2, ..., y_s\} \mid s \in N$ могут быть использованы внешними по отношению к системе нечеткого вывода устройствам.

В качестве метода дефаззификации предлагается использовать комбинацию методов левого $y = \min\{x_m\}$ и правого $y = \max\{x_m\}$ модального значений (5).

$$y = \min(x_m) + \left(\frac{\max(x_m) - \min(x_m)}{2} \right), \qquad (5)$$

где x_m – модальное значение нечеткого множества некоторой выходной переменной w_i. Процедура дефаззификцации выходной переменной w_i на базе аппарата МНСП приведена на рис. 2 (*в*).

Маркировка позиции *FP_Ci* представляет собой аккумулированное значение функции принадлежности выходной переменной w_i. Маркировка позиции *P_Yi* представляет дефаззифицированное значение y_i выходной переменной w_i. Позиция *P_Max* и *P_Min* представляют максимальное и минимальное модальные значения соответственно. Позиция *P_Count* хранит значение количества аккумулированных функций принадлежности для выходной переменной w_i.

Формально этап дефаззификации считается законченным, когда для каждой выходной переменной w_i получено соответствующее числовое значение y_i.

Модифицированные нечеткие сети Петри являются расширением аппарата СП и позволяют моделировать технические и информационные процессы, а также системы управления, основанные на нечетких продукционных правилах. В статье была рассмотрена структура аппарата МНСП, приведены модели этапов фаззификации, аккумуляции и дефаззификации. Определена область применения модифицированного расширения.

Литература

Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб., 2005.

УДК 621.746. 27

С.В. Лукин, В.В. Мухин, Н.И. Шестаков, Ю.В. Антонова, М.С. Митюшова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОХЛАЖДЕНИЯ СЛИТКА В ТЕРМОСТАТЕ

В статье описана математическая модель, позволяющая численно рассчитывать процесс охлаждения слитка, извлеченного из изложницы и помещенного в термостат. Термостаты применяются для сохранения физической теплоты слитка в процессе транспортировки от изложницы до нагревательной печи.

Слиток, термостат, охлаждение.

The paper describes the mathematical model that allows calculating the process of cooling of the ingot extracted from the mould and put into the thermostat. Thermostats are used to store the physical heat of the ingot during the transportation from the mould to the heating stove.

Ingot, thermostat, cooling.

Стальные слитки, извлекаемые из изложниц, при отсутствии возможности сразу поместить в нагревательную печь, необходимо расположить в термостатах для сохранения физической теплоты слитка. После извлечения слитка из изложницы имеется значительная неравномерность температуры как по сечению слитка, так и по его поверхности, причем в центре слитка температура выше, чем на поверхности. В термостате происходит выравнивание температуры по поверхности слитка и повышение средней температуры поверхности, при одновременном понижении температуры центральной части. В идеальном термостате (без тепловых потерь) через определенное время происходило бы выравнивание температуры во всех точках слитка, после чего температура уже не изменялась. В реальных термостатах, применяемых на практике, всегда имеются некоторые потери теплоты через теплоизолированные стенки термостата в окружающую среду, а также первоначальные потери тепла, связанные с нагревом ложемента, на который укладывается слиток (слитки) в термостате. В таких термостатах происходит медленное непрерывное охлаждение слитка со временем, а полного выравнивания температуры по сечению не происходит.

В научно-технической литературе отсутствуют достаточно точные математические модели охлаждения слитка в термостате, без которых нельзя точно рассчитывать процесс охлаждения и дальнейшего нагрева слитка в печи. Типичный термостат – это прямоугольный короб с внутренними размерами 2,7×1,26×1,175 м. В него загружаются слитки (или один крупный слиток), извлеченные из изложницы. Основание термостата выложено из кирпича толщиной 0,15 м, на этом основании установлен стальной ложемент, куда укладываются слитки, массой $M_{лож}$ = 267 кг. Теплоизолированная крышка (колпак) термостата поднимается и опускается краном на основание. Толщина тепловой изоляции крышки составляет δ = 0,15 м, изоляцией является керамоволокно FIBERBLANKETS 128, у которого плотность 16 кг/м^3, теплопроводность – 0,06 Вт/(м·К), теплоем-