



It is shown that the given experience data indicate the fact that readings of temperatures, fixed with thermopairs in different places of working range, can differ considerably. It makes the calculation methods of metal heating not really usable.

И. А. ТРУСОВА, С. В. КОРНЕЕВ, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, П. Э. РАТНИКОВ, БНТУ

УДК 669.04

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Введение

Равномерность нагрева заготовок в нагревательных и термических печах в значительной степени предопределяет механические и технологические свойства готовых изделий. Температурный режим и уровень температуры в печи определяют теплопередачу к металлу и, следовательно, скорость его нагрева, распределение температуры в нагреваемом металле, интенсивность окислительно-образования и другие важные параметры, характеризующие процесс тепловой обработки материала и работу самого агрегата.

Качественное регулирование температуры в рабочем пространстве печи предполагает выбор соответствующей точки контроля, установку необходимого датчика температуры, выбор оптимального регулятора и соответствующую его настройку, а также выбор исполнительного механизма.

Динамические характеристики объекта регулирования зависят от способа измерения температуры. Можно выделить несколько способов контроля температуры в печи:

- а) термопарами, расположенными в малоинерционных чехлах;
- б) радиационным пирометром, визированным на дно специального стакана или стенку печи;
- в) радиационным пирометром, визированным на факел.

Выбор того или иного способа измерения температуры определяется теплотехническими, метрологическими и конструктивными требованиями. Количественные характеристики переходных кривых существенно зависят от режима работы печи. Для методических и проходных печей (непрерывного действия) статические и динамиче-

ские характеристики меняются с изменением производительности, т. е. при возмущениях по нагрузке. В печах периодического действия эти свойства контура регулирования температуры зависят от времени цикла нагрева.

Для наиболее качественного управления процессом нагрева в печах необходима информация о температуре нагреваемого металла. Измерение этого параметра, как известно, вызывает ряд затруднений. Традиционный способ контроля этого параметра – по температуре печного пространства, так как данный показатель наиболее ответственен за температуру металла в печи. Дальнейшее развитие в решении проблемы контроля нагрева металла связано с появлением различного рода измерителей непосредственно температуры поверхности металла. Известны двух- и многопирометрические системы измерения, в которых оценка измеряемого параметра производится по взвешенным сигналам пирометров, установленных в определенных точках печи и направленных на поверхность металла. Если металл имеет невысокую температуру относительно излучающих на него поверхностей (стен, свода, факела) и особенно при низкой степени черноты металла, то измерение температуры поверхности металла пирометром невозможно из-за большой доли отраженного излучения.

Неудовлетворительная точность определения температуры поверхности системой пирометров, направленных только на нагреваемый металл, привела к созданию так называемых двухдатчиковых систем измерения, состоящих из пирометра, направленного на поверхность металла, и датчика корректирующего сигнала (например, пирометра, визированного на футеровку).

Указанные системы достаточно сложны и могут применяться на крупных металлургических печах. Для небольших нагревательных и термических печей с разнообразной садкой данный способ контроля и регулирования нагрева металла не перспективен, поэтому для точного и равномерного нагрева металла необходимо использовать традиционные способы измерения «температуры печи» с расширением использования данных компьютерного моделирования нагрева.

Методика исследования

Температура в печи определяется интенсивностью подвода и сжигания топлива и в этом смысле она является регулируемым параметром. Однако в большинстве случаев расчета нагрева металла или компьютерного моделирования нагрева металла температура в печи рассматривается как заданная исходная величина, т. е. как регулирующее воздействие по отношению к температуре металла.

Нахождение температурных полей связано с решением дифференциального уравнения теплопроводности, которое устанавливает зависимость между температурой, временем и координатами элементарного объема.

Для трехмерной модели нагрева или охлаждения уравнение теплопроводности запишем следующим образом:

$$\rho_j(T)c_{pj}(T)\frac{\partial T_j}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{xj}(T_j)\frac{\partial T_j}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{yj}(T_j)\frac{\partial T_j}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{zj}(T_j)\frac{\partial T_j}{\partial z}\right) + q_{vj}, \quad (1)$$

где j – индекс рассматриваемого материала (заготовка, футеровка и др.); ρ_j – плотность материала; c_{pj} – изобарная теплоемкость материала; T_j – температура; τ – время; x, y, z – координаты; λ_j – теплопроводность; q_{vj} – объемная плотность внутренних источников или стоков тепла.

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности необходимо установить распределение температуры внутри тела в начальный момент времени и закон взаимодействия между окружающей средой и поверхностью тела.

На практике в подавляющем большинстве случаев достаточно задавать равномерное распределение температуры внутри тела в начальный момент времени:

$$T_j(x, y, z, 0) = T_{0j} = \text{const.}$$

При моделировании нагрева заготовок в печах используют граничное условие третьего рода. В ряде случаев для части поверхности заготовки используют условие контакта с подом печи.

Граничное условие третьего рода задает либо закон конвективного, либо радиационного, либо суммарного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Например, граничное условие третьего рода при упрощенном варианте моделирования можно записать в следующем виде:

$$-\lambda_j(T)\frac{\partial T_j(\tau)}{\partial \bar{n}} = \alpha_j(T)(T_c - T_{ij}(\tau)),$$

где $T_{ij}(\tau)$ – температура поверхности металла; T_c – температура печной среды (печи).

В случае конвективного теплообмена $\alpha_j = \alpha_{kj}$ – коэффициент конвективного теплообмена; в случае радиационного теплообмена $\alpha_j = \alpha_{dj} = \varepsilon\sigma((T_{ij}^2(\tau) + T_c^2)(T_{ij}(\tau) + T_c))$; в случае суммарного теплообмена $\alpha_j = \alpha_{kj} + \alpha_{pj}$.

Для дальнейшего исследования влияния места установки термопары на ее показания будем рассматривать только радиационный теплообмен и конвективную составляющую намеренно примем равной нулю.

Для серых тел радиационный поток можно записать в следующем виде:

$$q_j = \varepsilon_j(P_j - \sigma T_j^4),$$

где ε_j – излучательная способность поверхности тела; P_j – полный падающий на поверхность тела радиационный поток; σ – постоянная Стефана-Больцмана; T_j – температура поверхности тела.

Полный падающий на поверхность тела радиационный поток y :

$$P_j = P_{mj} + F_{aj}\sigma T_{aj}^4,$$

где P_{mj} – взаимное излучение, приходящее от всех границ в модели, Вт/м²; F_{aj} – коэффициент облученности, равный доле области пространства, не покрытой другими границами и изменяющийся от 0 до 1; T_{aj} – температура удаленного источника (среды).

Анализ влияния места установки термопары на результаты ее показаний

Рассмотрим экспериментальные данные по нагреву стальных заготовок диаметром 150 мм в камерной печи, имеющей три термопары, расположенные на разной высоте (шаг равен 250 мм) на боковой стенке печи. Схема экспериментальной нагревательной печи приведена на рис. 1. При проведении эксперимента функционировала одна верхняя плоскопламенная горелка.

На рис. 2 представлены результаты термометрирования процесса нагрева заготовок в печи.

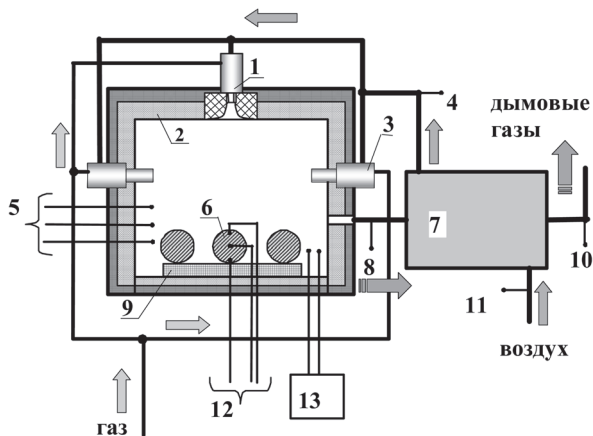


Рис. 1. Схема экспериментальной нагревательной печи ПВП-1: 1 – плоскопламенная горелка; 2 – футеровка печи; 3 – короткофакельная горелка; 4 – термопара контроля температуры подогретого воздуха; 5 – термопары контроля температуры печи; 6 – заготовка; 7 – рекуператор; 8 – термопара контроля температуры дымовых газов до рекуператора; 9 – подовая решетка; 10 – термопара контроля температуры дымовых газов после рекуператора; 11 – термопара контроля начальной температуры воздуха; 12 – термопары контроля температуры заготовки; 13 – приборы измерения состава дымовых газов и давления в печи

Как следует из рисунка, разность в показаниях второй и третьей термопар составляет 40 – 60 °С, а между первой и третьей – 50 – 210 °С.

Было также определено, что в экспериментальной печи, имеющей небольшие геометрические размеры относительно мощности плоскопламенной горелки, большое влияние на показания термопар (особенно верхней) оказывают также гидродинамический режим (особенно в начале нагрева при большом расходе газа) и конвективная составляющая теплообмена газов с термопарами, поэтому для дальнейшего анализа рассматривали только радиационный теплообмен.

При решении задачи радиационного нагрева применен метод конечных элементов. Для исследования влияния места установки термопары на ее

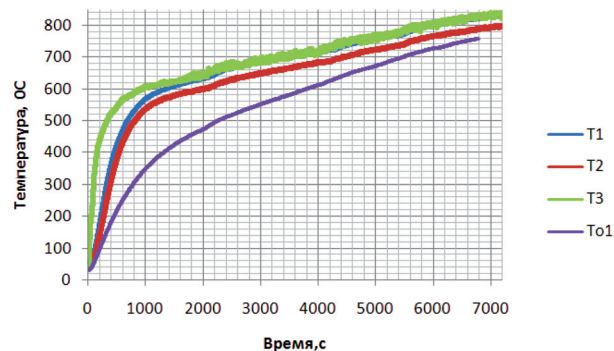


Рис. 2. Показания трех термопар, фиксирующих температуру экспериментальной печи (рис. 1), и температура поверхности заготовки

показания использовали двумерную модель нагрева заготовок бесконечной длины (например, расположенных в торец друг к другу). Исходные данные: диаметр заготовки 200 мм, ширина рабочего пространства 1,4 м, теплофизические свойства футеровки печи соответствуют волокнистым футеровкам, а теплофизические свойства заготовок показаны на рис. 3.

При решении задачи для поверхности свода печи использовано граничное условие первого рода с температурой поверхности 1000 °С, для остальных поверхностей – граничные условия радиационного теплообмена типа поверхность-поверхность. На внешней поверхности футеровки задан конвективный поток с коэффициентом теплоотдачи, равным 10 Вт/(м²·К). Возможное расположение термопар показано на рис. 4, а.

Результаты расчета температур в термопарах, установленных в различных местах рабочего пространства, представлены на рис. 5.

Рассмотрено также влияние места установки термопары для трехмерной модели печи с тремя нагревателями, расположенными в виде боковых излучателей. Степень черноты поверхности излучателей 0,25, мощность каждого объемного источ-

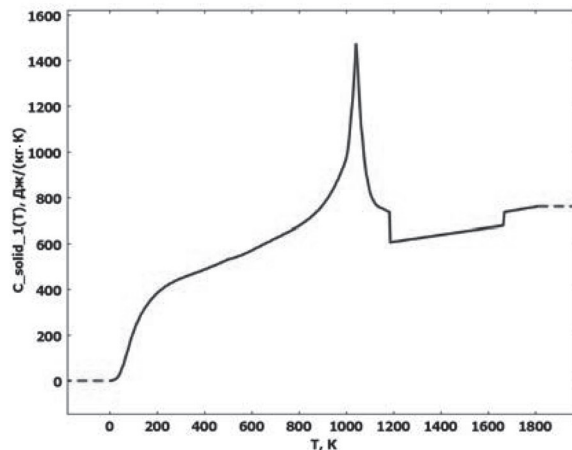
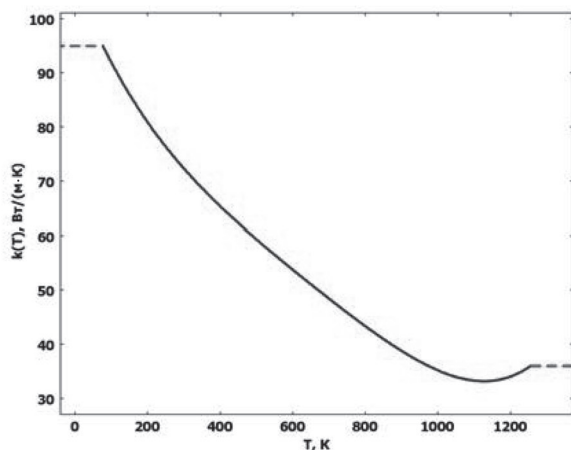
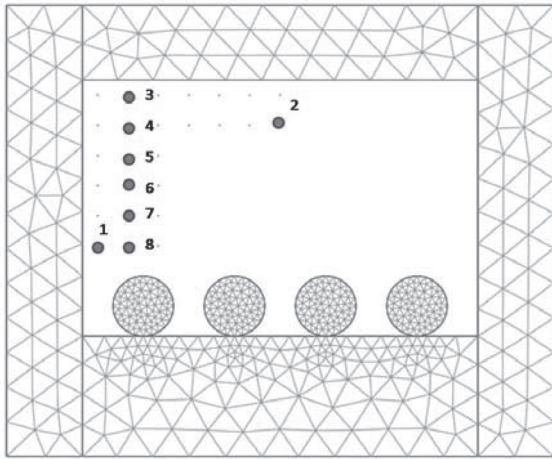
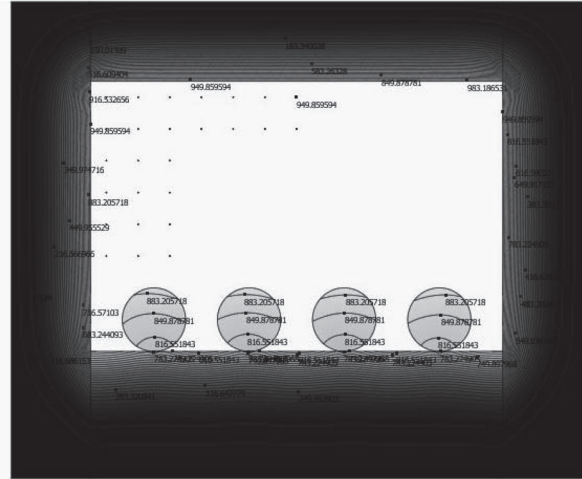


Рис. 3. Теплофизические свойства нагреваемых заготовок

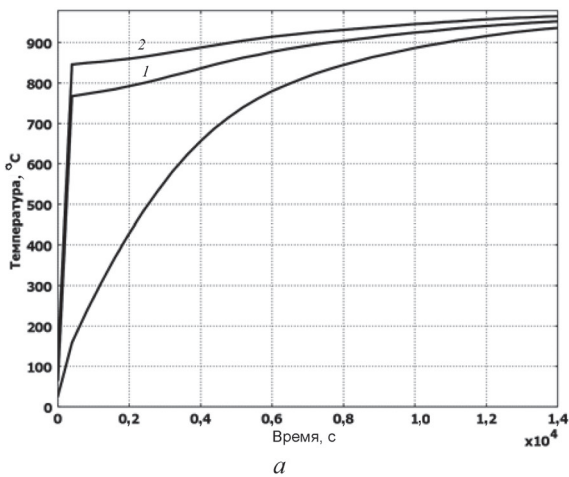


a

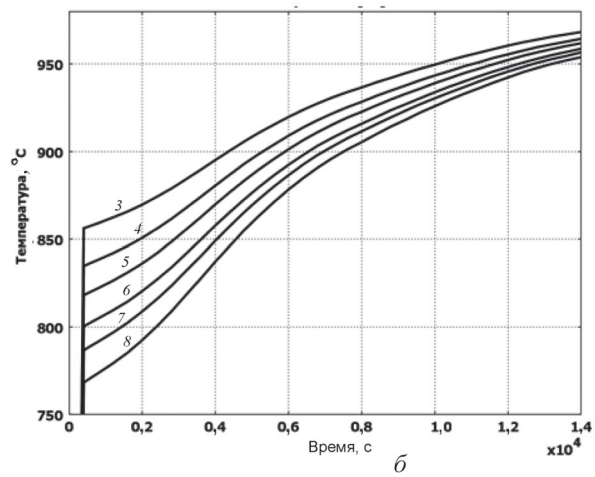


б

Рис. 4. Расчетная сетка конечных элементов (контрольные термопары обозначены цифрами) (*a*) и температурные поля заготовок и футеровки через 3 ч нагрева (*б*)

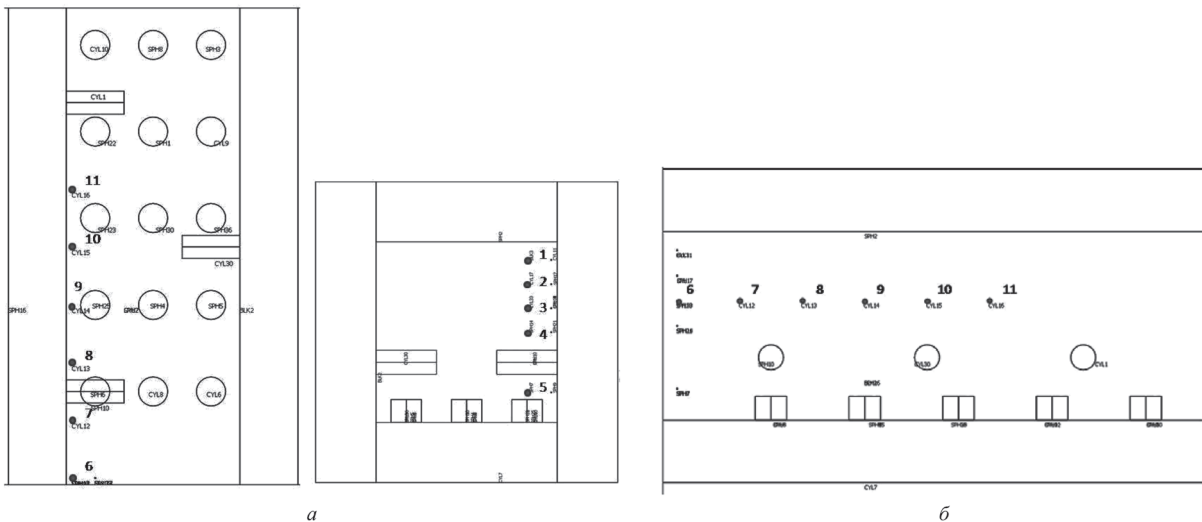


a



б

Рис. 5. Изменение температур, фиксируемых термопарами (1, 2), и температура поверхности заготовки (*a*) и температуры, фиксируемые термопарами (3–8) (*б*)



a

б

Рис. 6. Схема расположения рассматриваемых элементов в печи (цифрами обозначены контрольные термопары): *a* – вид сверху и в поперечном сечении печи; *б* – в продольном сечении печи

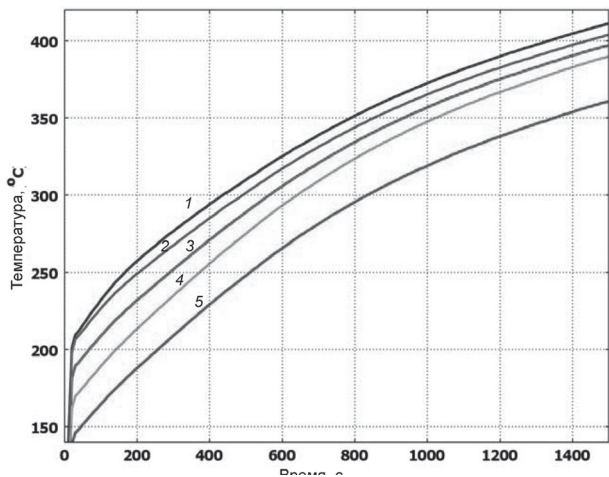


Рис. 7. Температуры, фиксируемые термопарами 1–5

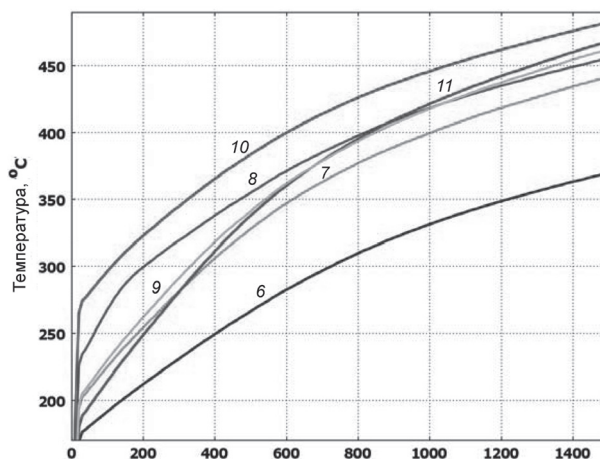


Рис. 8. Температуры, фиксируемые горизонтальным рядом термопар (6–11)

ника тепловыделения 17 МВт/м^3 . Расположение термопар показано на рис. 6, результаты расчета – на рис. 7, 8.

Анализ влияния местоположения и количества излучателей на равномерность нагрева заготовок

На рис. 9 приведены поля температур для различных моментов времени, полученные в резуль-

тате моделирования радиационного нагрева мелких деталей. Наибольшая неравномерность температур наблюдается в начальный период нагрева и с течением времени уменьшается.

При проектировании печи после разработки эскизного проекта и выбора всех материалов проводится уточняющий расчет теплового баланса печи с окончательным выбором системы отопле-



Рис. 9. Поля температур в рабочем пространстве печи по истечении 10; 16,7 и 25 мин нагрева

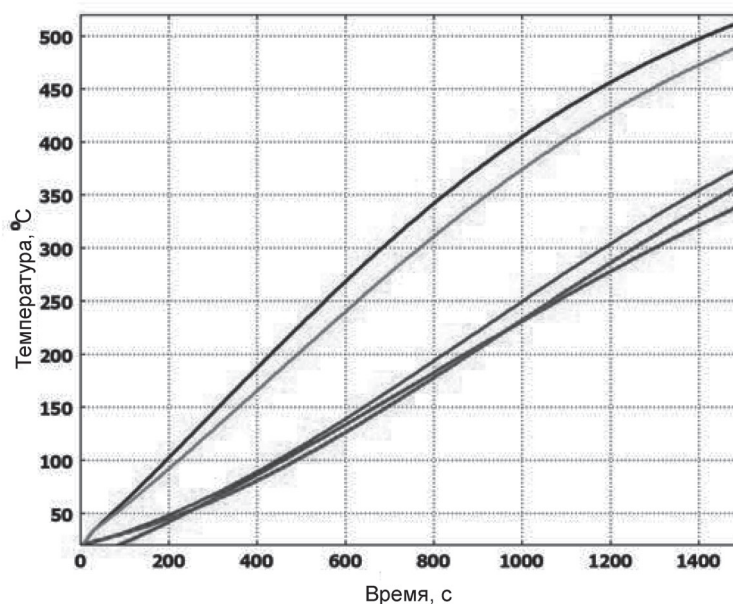
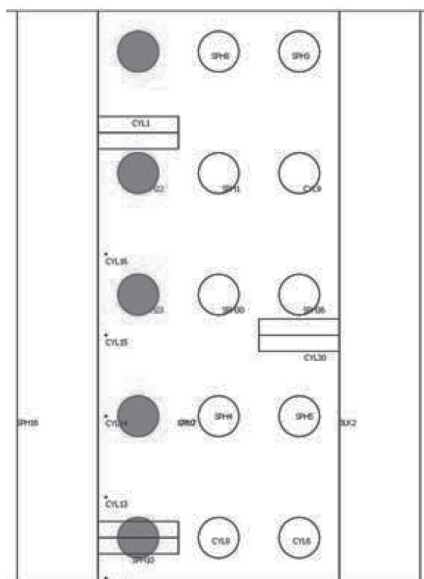


Рис. 10. Зависимость средних температур поверхности заготовок от времени (левый ряд) при высоте горелок над уровнем пода 0,1 м

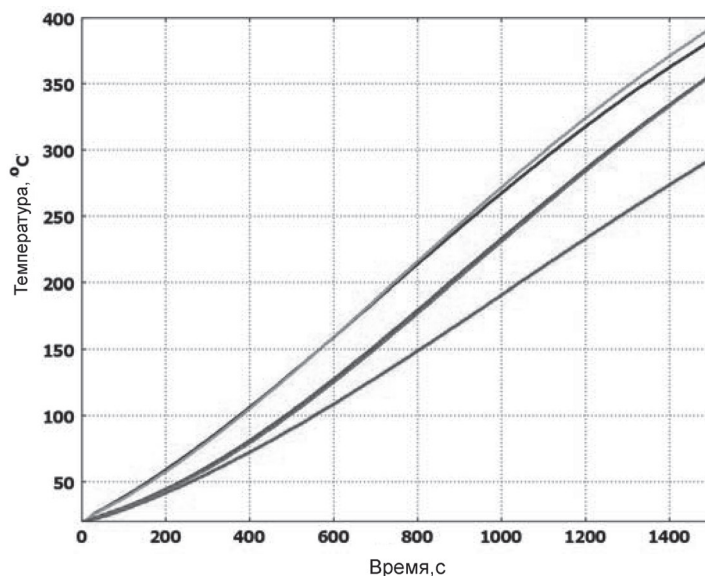
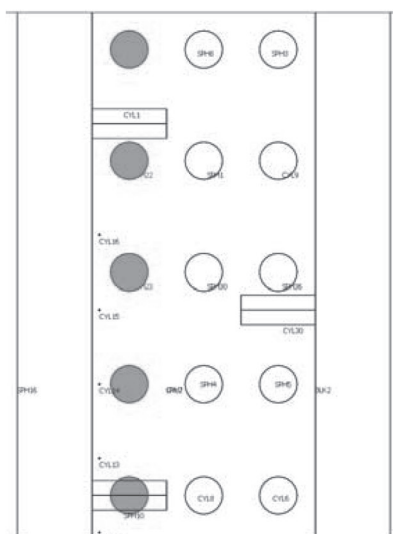


Рис. 11. Зависимость средних температур поверхности заготовок от времени (левый ряд) при высоте горелок над уровнем пода 0,15 м

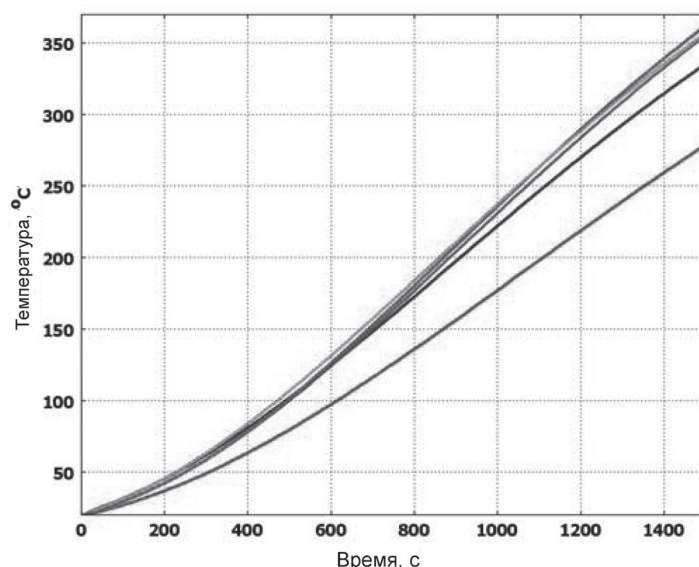
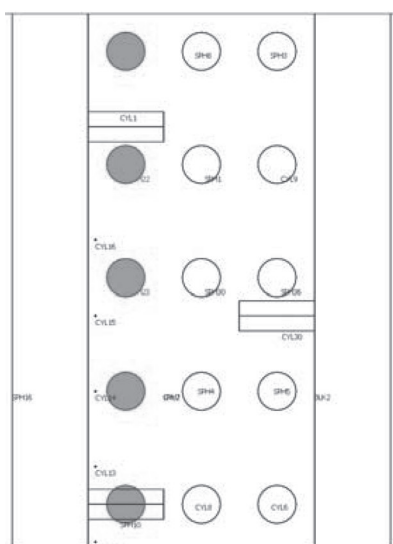


Рис. 12. Зависимость средних температур поверхности заготовок от времени (левый ряд) при высоте горелок над уровнем пода 0,2 м

ния печи, т. е. определяется расход топлива и выбираются мощности горелочных устройств для обеспечения требуемых параметров нагрева. Эту задачу можно решать различными методами, в том числе и с применением методов компьютерного моделирования в зависимости от требуемой точности.

При выборе системы отопления печи необходимо учитывать влияние расположения и количества горелочных устройств на равномерность и скорость нагрева заготовок. Для анализа влияния месторасположения излучателей и их количества были проведены многовариантные численные расчеты. Некоторые результаты приведены на рис. 10–14.

Анализируя результаты расчета, можно отметить, что увеличение высоты излучателей над за-

готовками для левого ряда сказывается положительно в отношении равномерности нагрева, но уровень температур при этом достигается меньший. Для среднего ряда увеличение высоты излучателей не приводит к положительным результатам ни в отношении равномерности нагрева, ни в отношении скорости нагрева.

В связи с этим для данной задачи при моделировании необходимо учитывать конвективную составляющую.

Для исследования влияния количества горелочных устройств на равномерность нагрева заготовок был рассмотрен вариант с девятью излучателями, мощностью, эквивалентной трем рассмотренным ранее. Таким образом, удельная объемная мощность тепловыделения каждого источника

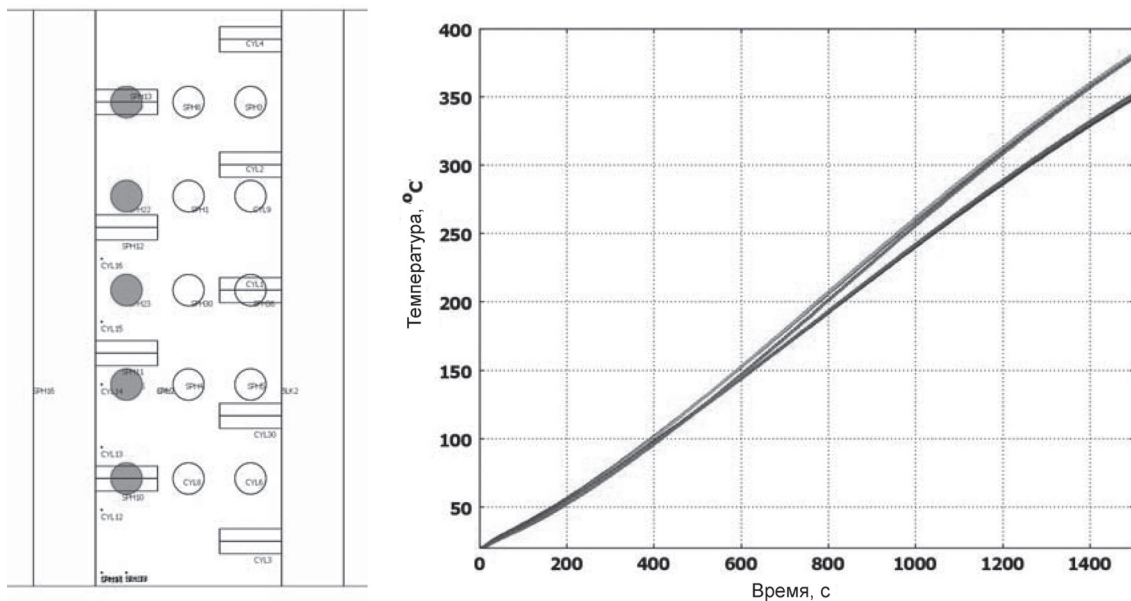


Рис. 13. Зависимость средних температур поверхности заготовок от времени (левый ряд) при высоте горелок над уровнем пода 0,1 м

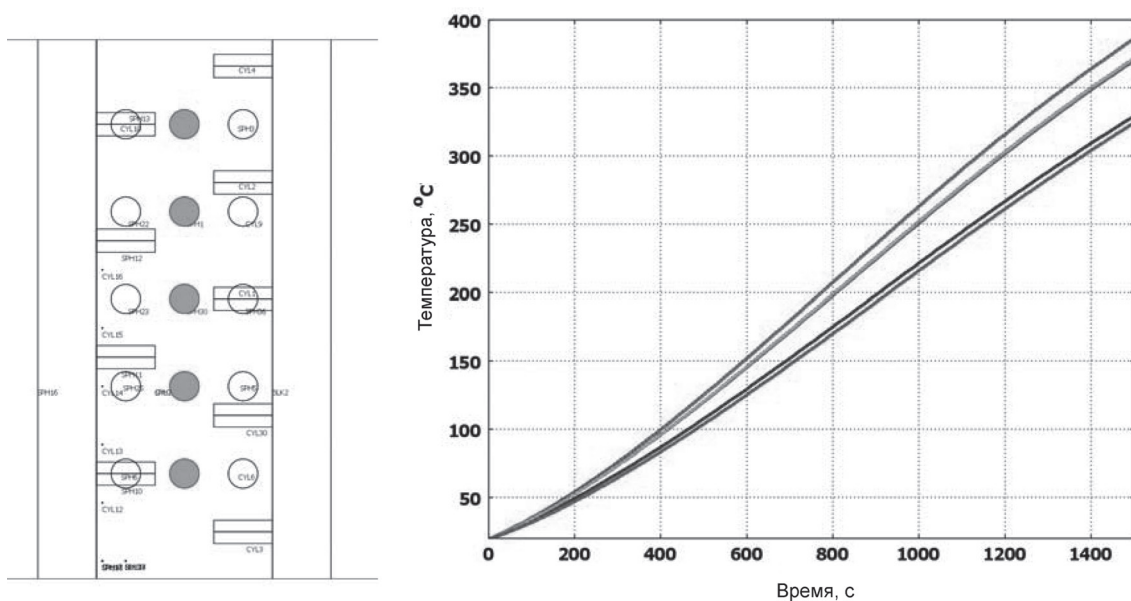


Рис. 14. Зависимость средних температур поверхности заготовок от времени (средний ряд) при высоте горелок над уровнем пода 0,1 м

составляет $5,667 \text{ МВт/м}^3$. Размеры заготовок $\text{Ø}54 \times 38 \text{ мм}$.

Анализируя результаты, можно отметить, что увеличение количества горелочных устройств с уменьшением их мощности однозначно положительно сказывается на равномерности нагрева.

Выводы

Анализ опытных данных свидетельствует о том, что показания температур, фиксируемые термомпарами в различных местах рабочего пространства, могут существенно различаться. Это делает мало пригодными методы расчета нагрева металла, основанные на понятии о температуре печи и при-

водит к необходимости увеличивать время выдержки металла с целью гарантированного достижения необходимых температур в характерных точках сечения заготовок и выравнивания их по сечению. Результаты моделирования показывают, что предлагаемый подход к расчету нагрева металла способен обеспечить большую гибкость технологического процесса, а также определить оптимальные конструктивные параметры, включая местоположение и количество термпар, а также местоположение и количество источников теплоты с целью обеспечения максимальной равномерности нагрева и точности регулирования режима.