

УДК 66.045.3

А. Ф. Жарков, О. Г. Чеснокова**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ С ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕЧЕЙ**

Статья освещает результаты расчетов температуры стенки печи с линейными и нелинейными теплофизическими свойствами, зависящими от температуры. Неучет нелинейности приводит к занижению температуры на наружной поверхности печи. Нелинейность теплофизических свойств материалов необходимо учитывать при проектировании и расчетах подобных объектов, что значительно повысит их эксплуатационную безопасность, понизит производственный травматизм.

Ключевые слова: печь, теплофизические свойства материалов, коэффициент теплопроводности, расчет температурных полей.

The article highlights the results of calculations of the temperature of the furnace walls with linear and nonlinear thermophysical properties that depend on the temperature. Not accounting of the nonlinearity leads to an underestimation of the temperature on the outer surface of a furnace. The nonlinearity of thermophysical properties of materials must be considered when designing and calculating such objects. It will significantly increase their operational safety and reduce the number of industrial injuries.

Key words: furnace, thermophysical properties of materials, thermal conductivity coefficient, calculation of temperature fields.

Многоподовая печь германской фирмы Polisius (Полизиус) предназначена для обжига фильтрационного кека гидроксида магния $Mg(OH)_2$ и получения окиси магния MgO . Стенки печи в регулярном сечении представляет собой многослойную конструкцию общей толщиной 363 мм, состоящую из слоев: металлическая оболочка толщиной 20 мм; волокнистая бумага (вата) из силиката алюминия Alsitra KP 1250 — 5 мм; теплоизоляционные бетонные кирпичи Carath FL-951 с сырьевой основой вермикулита — 70 мм; огнеупорный легковесный кирпич JM 23 — 114 мм; огнеупорный легковесный кирпич Parrath FL 25-08 — 40 мм; плотный огнеупорный кирпич Silrath AK-60 — 114 мм. Внешний радиус печи составляет 3913 мм (RATH. Datenblatt. Технические паспорта: Alsitra KP 1250, Carath FL-951, JM 23, Parrath FL 25-08, Silrath AK-60; RATH. ETAGENOFEN / ЭТАЖНАЯ ПЕЧЬ МН 78-12. Zusammenbau).

В работе представлены результаты теплотехнических расчетов стенки печи в стационарном режиме при температурах внутри печи от 300 до 1000 °С. Произведено сравнение результатов расчета с постоянными теплофизическими свойствами и нелинейными, зависящими от температуры. Изменения коэффициента теплопроводности и теплоемкости материалов слоев в зависимости от температуры представлены в табл. 1, 2 и рис. 1—7.

Таблица 1

Изменение коэффициента теплоемкости материалов слоев C , Дж/(кгК), в зависимости от температуры

t , °К	Parrath FL-25-08	кирпич Silrath AK 60
273	960	980
673	960	980
1473	1060	1120
1673	1060	1120

Т а б л и ц а 2

Изменение коэффициента теплопроводности материалов слоев λ , Вт/мК, в зависимости от температуры

	Alsitra KP 1250	Carath FL-951	Огнеупорный легковесный кирпич JM 23	Parrath FL-25-08	Плотный огнеупорный кирпич Silrath AK-60
$t, ^\circ\text{K}$	2	3	4	5	6
373	0,03	0,13	0,12	0,36	2
473	0,03	0,13	0,12	0,36	2
673	0,05	0,15	0,12	0,36	2
873	0,08	0,17	0,14	0,36	2
1073	0,13	0,2	0,17	0,41	2,02
1273	0,21	0,22	0,19	0,47	2,12
1473				0,5	2,32
1673					2,64

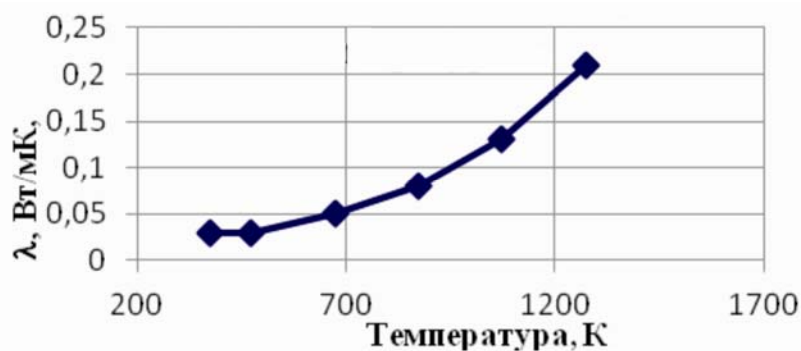


Рис. 1. График изменения коэффициента теплопроводности Alsitra KR 1250 в зависимости от температуры

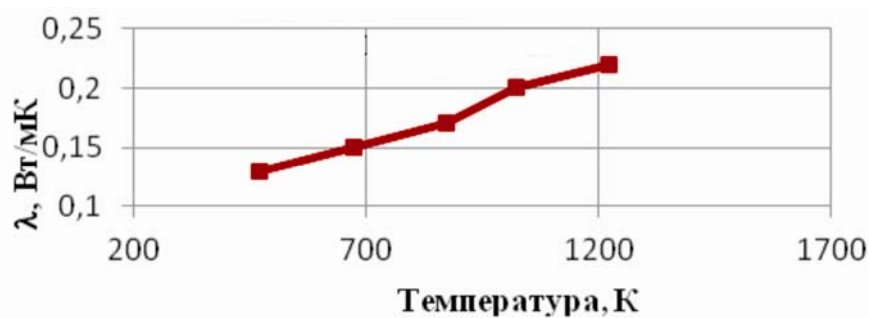


Рис. 2. График изменения коэффициента теплопроводности Carath FL-951 в зависимости от температуры

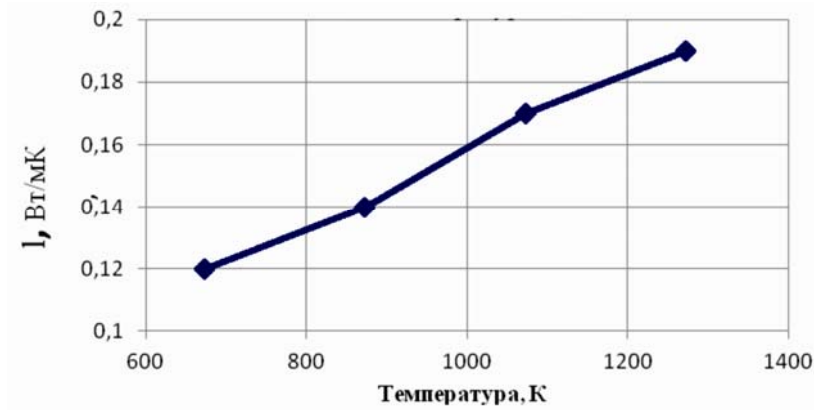


Рис. 3. График изменения коэффициента теплопроводности огнеупорного легковесного кирпича JM 23 в зависимости от температуры

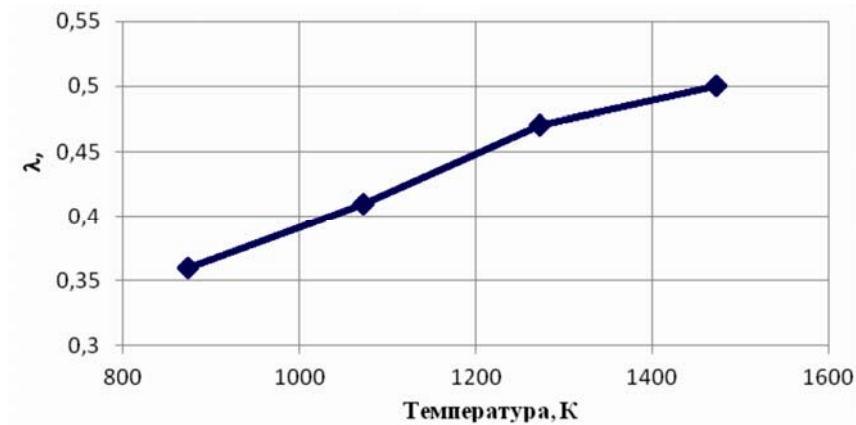


Рис. 4. График изменения коэффициента теплопроводности огнеупорного легковесного кирпича Parren FL-25-08 в зависимости от температуры

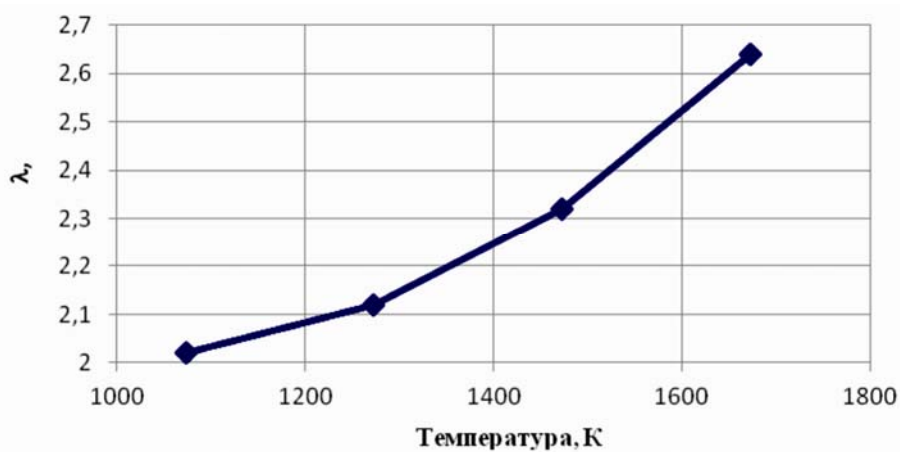


Рис. 5. График изменения коэффициента теплопроводности плотного огнеупорного кирпича Silrath AK 60 в зависимости от температуры

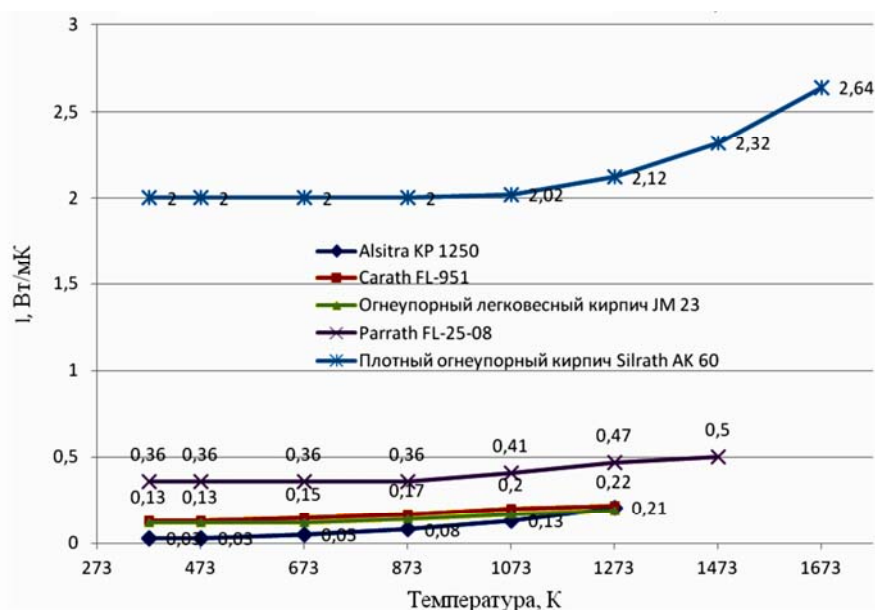


Рис. 6. График изменения коэффициента теплопроводности материалов слоев I, Вт/м·К

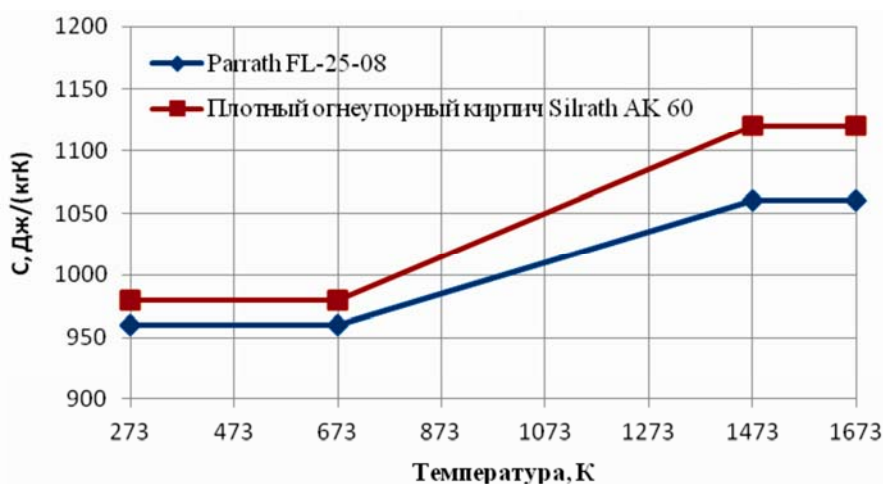


Рис. 7. Изменение коэффициентов теплопроводности и теплоемкости материалов слоев в зависимости от температуры

Распределение температурных полей определялось из решения дифференциального уравнения:

$$\nabla * (\lambda \nabla T) = 0.$$

При расчете учитывали следующие граничные условия (ГУ):

температура внутренней стенки печи принималась от +300 до 1000 °С.

На наружной поверхности металлической оболочки поставлены граничные условия (ГУ) по тепловому потоку

$$-n(-\lambda \nabla T) = \alpha(T_{\text{ext}} - T),$$

где α — коэффициент теплоотдачи, принят по табл. 4 СП 50.13330.2012, равен $8,7 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ для наружной поверхности; T_{ext} — температура наружной стенки, принята равной $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ как наиболее неблагоприятная с точки зрения безопасной эксплуатации в летний период; n — вектор нормали к поверхности.

Стационарный режим печи рассмотрен как для плоской задачи в цилиндрической системе координат. По высоте был взят фрагмент стены печи высотой в 1 м (рис. 2). По краям радиального сечения ставили граничные условия симметрии:

$$-n(-\lambda \nabla T) = 0.$$

Задача решалась методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы COMSOL Multiphysics v4.3a (Comsol v.4.4. Nonlinear Structural Materials Module User's Guide; Comsol v.4.4. COMSOL Multiphysics. User's Guide) [1—5].

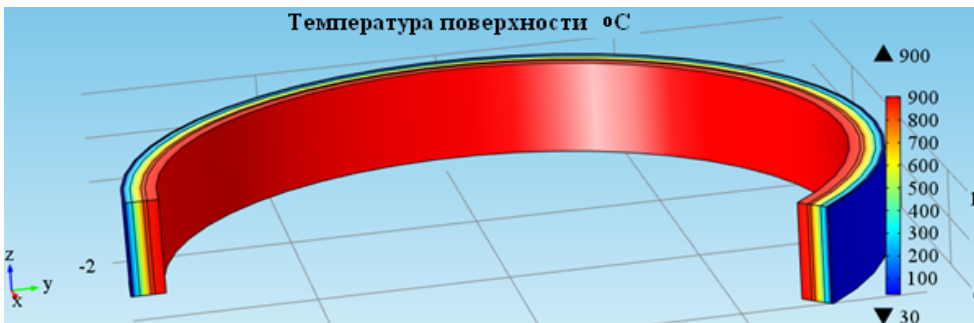


Рис. 8. Графическое представление

Вследствие плоской осесимметричной задачи для регулярного сечения при расчете стенки печи расчетная схема состоит из 10 293 элементов (рис. 9).

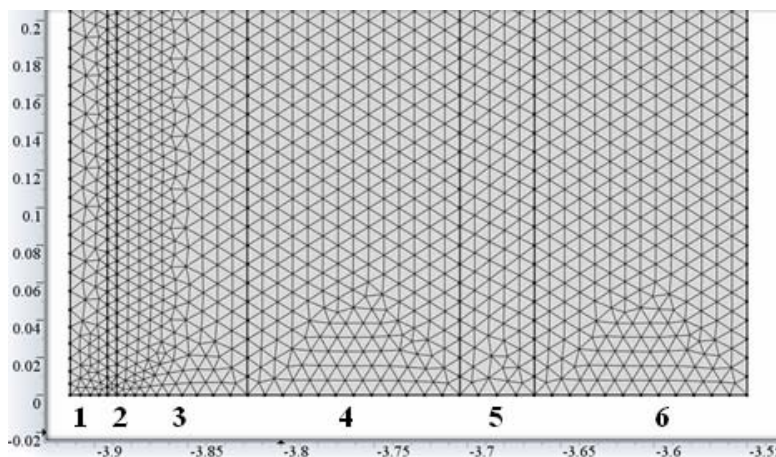


Рис. 9. Сетка КЭ на фрагменте расчетной схемы (1—6 — номера слоев)

Первоначально была рассчитана стенки печи в стационарном режиме с неизменными теплофизическими свойствами материалов слоев. Это, как правило, традиционные расчеты [6, 7], которые обычно используются в инженерной практике, так называемые «линейные», и они не требуют значительных машинных ресурсов. При этом свойства материалов были приняты при температуре +20 °С.

Далее был выполнен расчет с физической нелинейностью свойств материалов (табл. 1 и 2, рис. 7), которые зависят от температуры. С увеличением температуры в рабочей зоне происходит значительное возрастание ее на внешней поверхности печи при сравнении линейных и нелинейных расчетов (табл. 3, рис. 10). С увеличением температуры в рабочей зоне происходит значительное возрастание ее и внутри печи, в частности в зоне размещения волокнистой бумаги из силиката алюминия Alsitra KP 1250 при сравнении линейных и нелинейных расчетов (табл. 4, рис. 11). Сравнения распределений температурных полей при температурах в рабочей зоне 300...1000 °С в линейном и нелинейном расчетах приведены на рис. 6, 7.

Таблица 3

Сравнение температуры на наружной поверхности печи при линейном и нелинейном расчетах

$t, ^\circ\text{C}$	Нелинейный	Линейный
1000	88,1	76,4
900	78,8	70,6
800	69,9	64,9
700	61,7	59,1
600	54,4	53,4
500	47,9	47,6
400	41,8	41,9
300	36,0	36,1
200	30,2	30,3

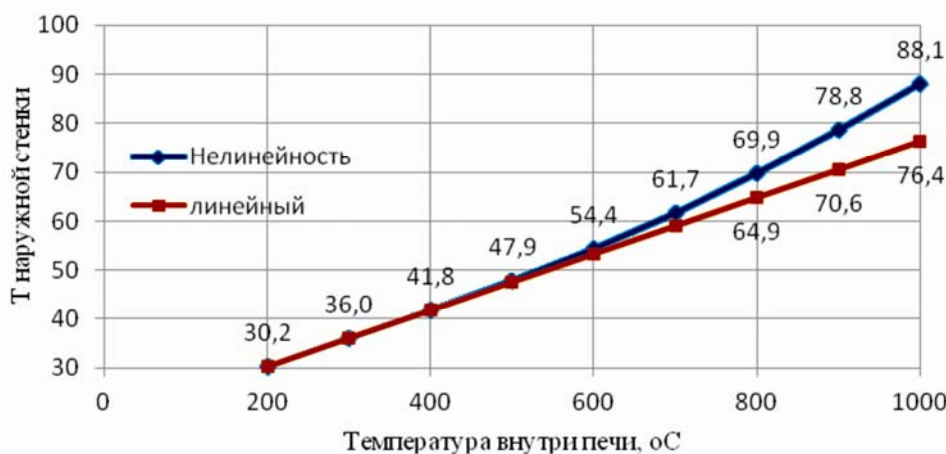


Рис. 10. Сравнение температуры на наружной поверхности печи при линейном и нелинейном расчетах

Таблица 4

Сравнение температуры на внутренней поверхности ваты из силиката алюминия Alsitra KP1250 при линейном и нелинейном расчетах

$t, ^\circ\text{C}$	Нелинейный	Линейный
1000	187,8	158,8
900	164,7	144,7
800	142,8	130,5
700	122,6	116,3
600	104,7	102,2
500	88,7	88,0
400	73,8	73,8
300	59,3	59,6
200	45,2	45,5



Рис. 11. Сравнение температуры на внутренней поверхности ваты из силиката алюминия Alsitra KR 1250 при линейном и нелинейном расчетах

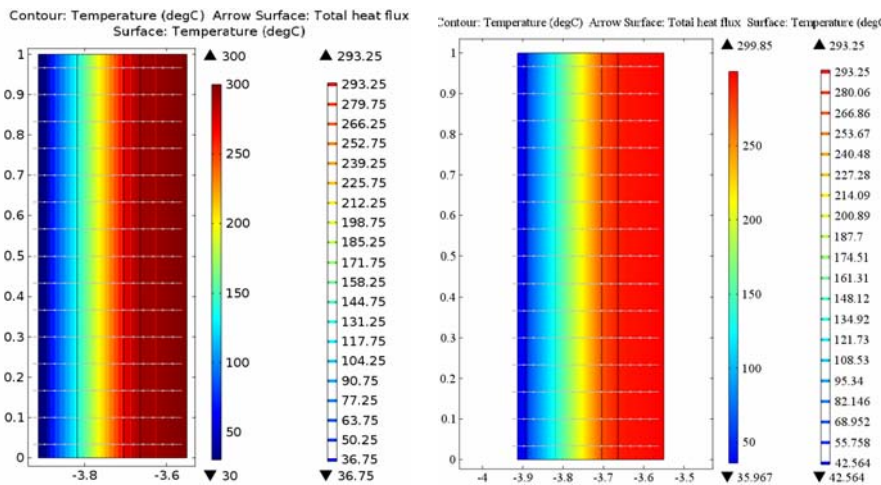


Рис. 12. Распределение температур в стенке печи при линейном и нелинейном расчетах при температуре внутри печи 300 °С

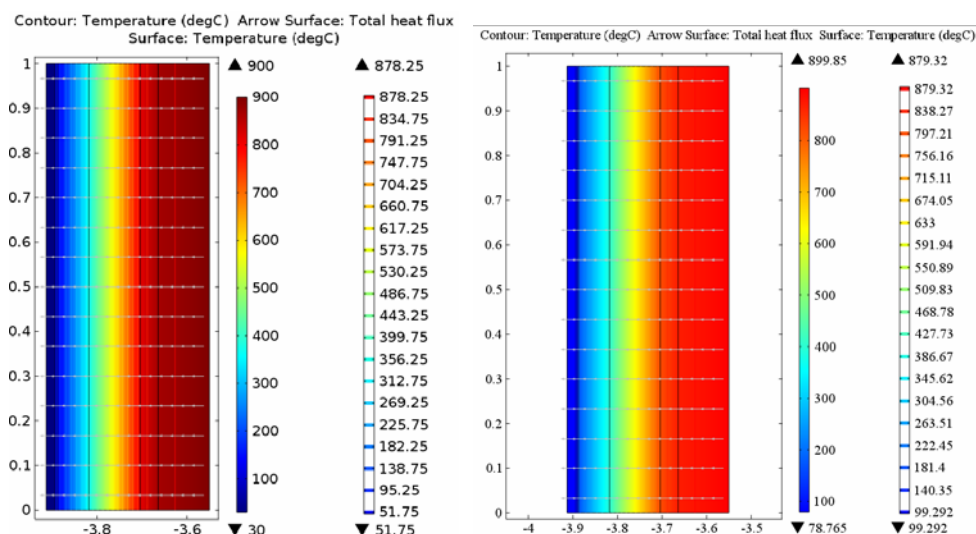


Рис. 13. Распределение температур в стенке печи при линейном и нелинейном расчетах при температуре внутри печи 900 °С

По требованиям нормативных документов (СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003 М., 2012) температуру на поверхности оборудования при металлическом покровном слое, расположенном на открытом воздухе в рабочей или обслуживаемой зоне, следует принимать не более 55 °С. Требования санитарно-эпидемиологических правил технологических процессов (СП 2.2.2.1327-03 Санитарно-эпидемиологические правила. Гигиенические требования к организации технологических процессов, производственному оборудованию и рабочему инструменту) еще более жесткие, по ним допустимая температура поверхности технологического оборудования при случайном контакте с ней в течении 10 с составляет 59 °С, а допустимая температура поверхности технологического оборудования и ограждающих устройств при контактном периоде до 8 ч составляет 43 °С.

Неточное определение температуры на поверхности печи может при эксплуатации привести к несчастным случаям и производственным травмам.

Выводы

1. Результаты расчетов температуры с линейными и нелинейными теплофизическими свойствами показали, что неучет нелинейности приводит к занижению температуры на наружной поверхности печи. Разница результатов увеличивается с возрастанием эксплуатационной температуры. При температуре внутри печи в 1000 °С эта разница составляет на внешней поверхности 15 %, а внутри печи до 20 %.

2. Нелинейность теплофизических свойств материалов необходимо учитывать при проектировании и расчетах подобных объектов [8], что значительно повысит их эксплуатационную безопасность, понизит производственный травматизм. Это потребует дополнительных конструктивных мероприятий, таких как изоляция, охлаждающие змеевики и т. п.

3. Кроме того, следует отметить, что значительная доля изменений распределения температуры и напряжений в конструкции появляется из-за раз-

личных конструктивных особенностей, такие как поды и перекрытия, технологические отверстия и применение в этих конструктивных элементах других материалов. Все это можно решить только в 3-мерной постановке задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красников Г. Е., Нагорнов О. В., Старостин Н. В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics. М. : НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.
2. Бирюлин Г. В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB DOC. Методическое пособие. СПб.: СПбГУИТМО, 2006. 78 с.
3. Chung J., Hulbert G. M. A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The generalized- α -method // J. Appl. Mech. 1993. V. 60. Pp. 371—375.
4. SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers / A. C. Hindmarsh, P. N. Brown, K. E. Grant, S. L. Lee, R. Serban, D. E. Shumaker and C. S. Woodward // ACM T. Math. Software 2005. V. 31. P. 363.
5. Brown P. N., Hindmarsh A. C. and Petzold L. R. Using Krylov methods in the solution of large-scale differential-algebraic systems // SIAM J. Sci. Comput. 1994. V. 15. Pp. 1467—1488.
6. Телегин А. С. Тепло-массоперенос. М. : Metallurgiya, 1995. 400 с.
7. Глишков М. А., Глишков Г. М. Общая теория печей. М. : Metallurgiya, 1978. 264 с.
8. Великородный Я. А., Жарков А. Ф., Чеснокова О. Г. К вопросу инженерной методики расчета приведенного термического сопротивления многослойных конструкций с неоднородными включениями // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 1(31). Ст. 10. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

1. Krasnikov G. E., Nagornov O. V., Starostin N. V. Modelirovanie fizicheskikh protsessov s ispol'zovaniem paketa Comsol Multiphysics. M. : NIYaU MIFI, 2012. 184 s.
2. Biryulin G. V. Teplofizicheskie raschety v konechno-elementnom pakete COMSOL / FEMLAB DOC. Metodicheskoe posobie. SPb.: SPbGUITMO, 2006. 78 s.
3. Chung J., Hulbert G. M. A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The generalized- α -method // J. Appl. Mech. 1993. V. 60. Pp. 371—375.
4. SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers / A. C. Hindmarsh, P. N. Brown, K. E. Grant, S. L. Lee, R. Serban, D. E. Shumaker and C. S. Woodward // ACM T. Math. Software 2005. V. 31. P. 363.
5. Brown P. N., Hindmarsh A. C. and Petzold L. R. Using Krylov methods in the solution of large-scale differential-algebraic systems // SIAM J. Sci. Comput. 1994. V. 15. Pp. 1467—1488.
6. Telegin A. S. Teplo-massoperenos. M. : Metallurgiya, 1995. 400 s.
7. Glinkov M. A., Glinkov G. M. Obshchaya teoriya pechei. M. : Metallurgiya, 1978. 264 s.
8. Velikorodnyi Ya. A., Zharkov A. F., Chesnokova O. G. K voprosu inzhenernoi metodiki rascheta privedennogo termicheskogo soprotivleniya mnogoslounykh konstruktssii s neodnorodnymi vkluchenyami // Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya. 2014. Vyp. 1(31). St. 10. Rezhim dostupa: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

© Жарков А. Ф., Чеснокова О. Г., 2015

Поступила в редакцию
в январе 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Жарков А. Ф., Чеснокова О. Г. Влияние теплотехнических свойств материалов с физической нелинейностью на эксплуатационную безопасность печей // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2015. Вып. 2(38). Ст. 3. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

For citation:

Zharkov A. F., Chesnokova O. G. [Impact of thermotechnical properties of materials with physical nonlinearity on operational safety of furnaces]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2015, no. 2(38), paper 3. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>