

УДК 001.891.573: 004.942: 666.97.035

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ
В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

канд. техн. наук А. М. НИЯКОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет, Беларусь)
<https://orcid.org/0000-0001-5106-6278>

д-р. техн. наук, проф. В. Н. РОМАНЮК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Аннотация. Представлены результаты научных исследований, позволивших разработать алгоритм компьютерного моделирования процесса ускоренной гидратации бетонных изделий в промышленных теплотехнологических установках, учитывающий распределённый источник внутренних тепловыделений, с помощью которого представляется возможным выполнять расчёты и визуализацию нестационарных полей температуры и коэффициента гидратации при твердении бетонных изделий подвергаемых тепловой обработке. Данный алгоритм и численная схема могут быть применены для разработки энергосберегающих режимов тепловой обработки бетонных изделий, имеющих сложную 3D-геометрию и неоднородную композитную структуру.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, математическое моделирование, кинетика гидратации цемента, температурные поля, трёхмерное нестационарное уравнение теплопроводности.

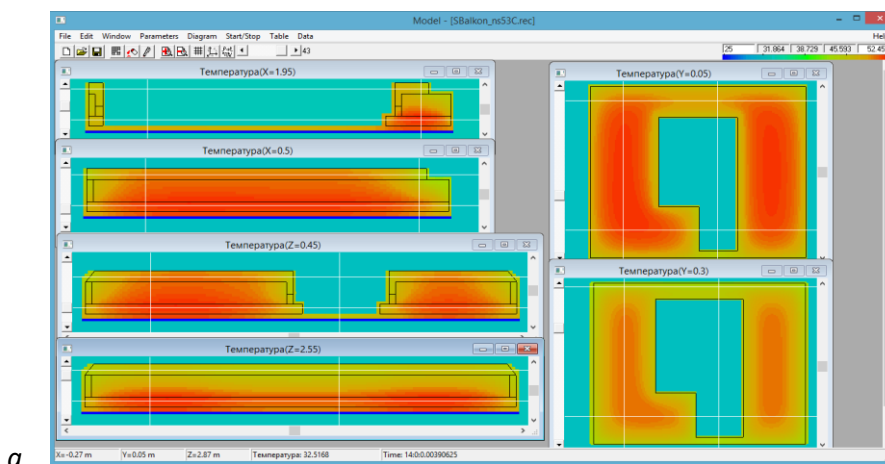
Применение численных методов математического моделирования позволяет находить решения сложных задач нестационарной теплопроводности при тепловой обработке (ТО) изделий из бетона и железобетона, имеющих сложные структуру и геометрическую форму. При этом обеспечивается учет всех важных конструктивных, технологических и теплотехнических факторов, влияющих на процессы, протекающие в теплотехнологических установках ускоренной гидратации [1–5]. В ранее опубликованных работах авторов с соавторами были представлены результаты исследований, посвященных математическому моделированию и разработке алгоритма и численной схемы расчетов распределения температуры и степени гидратации в пределах объема бетонных изделий, подвергаемых ТО в теплотехнологических установках [6–10]. Разработанная модель включает систему граничных и начальных условий, модельные функции изменения температуры греющей среды от времени ТО, основывающиеся на промышленных режимах, а также модельную функцию, учитывающую экзотермический характер реакций гидратации активной

части цементного клинкера. Система граничных и начальных условий описывает условия организации ТО в конкретных условиях. В качестве основного уравнения для расчёта распределения температуры в пространстве бетонного тела в течение времени ТО использовалось уравнение теплопроводности в трехмерной постановке, учитывающее распределенные в пространстве внутренние тепловыделения.

Сущность метода моделирования, примененного в работе, состоит в разбиении всего трёхмерного пространства модели на элементы прямоугольной (кубической) формы. Каждый элемент имеет параметры, описывающие физическое состояние среды (теплоёмкость, плотность, теплопроводность, температура, степень гидратации). Все элементы расчётного пространства образуют взаимосвязанную пространственную систему. Каждый такт моделирования соответствует дискретному моменту времени, которое изменяется с шагом Δt . Состояние каждого элемента изменяется на каждом такте моделирования в зависимости от его текущего состояния и состояния соседних элементов на предыдущем такте моделирования. Формула, по которой вычисляется новое значение параметра элемента (температуры и коэффициента гидратации), является конечно-разностной аппроксимацией численного решения дифференциального уравнения теплопроводности.

На основе описанного выше подхода были разработаны принципы формирования САЕ (системы автоматизированного моделирования) для расчёта процесса гидратации бетонных изделий при их тепловой обработке в промышленных тепло-технологических установках, написанная на языке C++, которая позволяет рассчитать и визуализировать пространственное распределение температуры и степени (коэффициента) гидратации в бетонном изделии произвольной геометрии для заданного времени тепловой обработки с целью разработки энергосберегающих режимов ТО.

На рисунке 1 представлены фрагменты визуализации результатов компьютерного моделирования ТО трёхслойной стеновой панели серии 90-м, производства ОАО «Трест № 16, г. Новополоцк», изготовление которой осуществляется на стенде горизонтального формования, полученные с помощью разработанной модели, численной схемы и алгоритма.



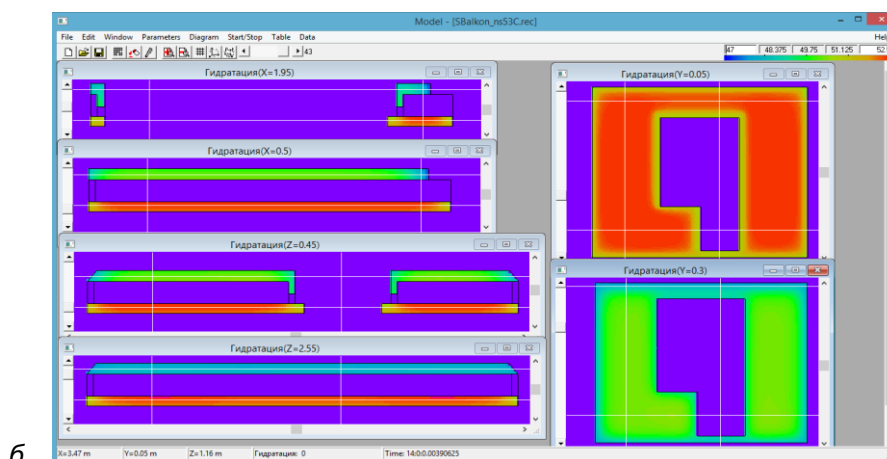


Рисунок 1. – Фрагмент численного моделирования распределения температуры (а) и коэффициента гидратации (б) в трёх проекциях на момент времени $T_0 \tau = 14$ часов

Заключение и выводы.

1. Разработана математическая модель и предложен алгоритм ее численного решения, позволяющие выполнять разработку энергоэффективных режимов ТО бетонных изделий в промышленных теплотехнологических установках по критерию достижения заданных значений степени гидратации цемента в любой точке внутреннего пространства изделий.

2. Выполнена проверка устойчивости полученной модели, определены пределы изменения шага моделирования по времени при заданном шаге моделирования в пространстве. Показаны предоставляемые разработанным алгоритмом возможности расчёта и визуализации процессов нагрева и твердения бетона при различной продолжительности его ТО.

3. Полученные результаты дают возможность производить разработку энергосберегающих режимов ТО бетонных изделий, а также могут быть использованы при проектировании новых и совершенствовании существующих теплотехнологических установок для ускоренной гидратации бетонных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ge, Zh. Predicting temperature and strength development of the field concrete: Retrospective Theses and Dissertations [Electronic resource] / Zhi Ge // Iowa State University. – 2005. – Mode of access: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2729&context=rtd>. – Date of access: 14.12.2018.
2. Моделирование прогрева стеновых панелей при термической обработке / С. В. Федосов [и др.] // Строительные материалы. – 2007. – № 2. – С. 86–87.
3. Kuriakose, B. Modelling of heat of hydration for thick concrete constructions – a note / B. Kuriakose, B.N. Rao, G.R. Dodagoudar, V. Venkatachalapathy // Journal of Structural Engineering. – 2015. – Vol. 42, No. 4, October – November. – P. 348–357.
4. Фролов, С. В. Математическое моделирование процесса тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий / С. В. Фролов, А. В. Лагутин // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75. – № 3.

5. Чичко, А.Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов / А.Н. Чичко // Вестник БНТУ. – 2003. – № 2. – С. 42–48.
6. Нияковский, А. М. Разработка математической модели процесса твердения бетона на основе трехмерного уравнения теплопроводности / А. М. Нияковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 16. – С. 72–79.
7. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский, В. Н. Романюк, А. Н. Чичко, Ю. В. Яцкевич // Наука и техника. – 2019. – Т. 18. – № 2. – С. 137–145. – DOI 10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145.
8. Нияковский, А. М. Алгоритм и численная схема моделирования нестационарных процессов тепловой обработки бетонных изделий / А. М. Нияковский, Ю. В. Яцкевич, А. Н. Чичко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2019. – № 4. – С. 50–61.
9. Нестационарная модель процесса гидратации железобетонного изделия, находящегося в программно-нагреваемой среде / А. М. Нияковский, В. Н. Романюк, А. Н. Чичко, Ю. В. Яцкевич // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2019. – Т. 63. – № 4. – С. 496–505. – DOI 10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505.
10. Численный анализ характеристик процесса тепловой обработки многослойных композитных изделий в теплотехнологических установках / В. Н. Романюк, А. М. Нияковский, А. Н. Чичко [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – Т. 65. – № 1. – С. 52–66. – DOI 10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66.