

Д. Н. Попов, А. А. Лебедева, Р. З. Касимов, Ф. Р. Гильманова
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск, popovtgu@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ ЛЬДА

В статье представлен подход к численной реализации двухфазной задачи Стефана, полезный при создании новых и совершенствовании существующих технических устройств для получения льда. Приведены особенности авторской методики расчета, выгодно отличающие ее от подобного рода разработок. Представлены результаты расчетов и проведено их обсуждение.

Ключевые слова: устройства генерации льда; двухфазная задача Стефана; математическое моделирование процессов теплопроводности и конвективного теплообмена; межфазная граница.

D. N. Popov, A. A. Lebedeva, R. Z. Kasimov, F. R. Gilmanova
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

METHOD OF CALCULATING THE PROCESSES OF ICE GENERATION

The article presents an approach to the numerical implementation of the two-phase Stefan problem, useful in creating new and improving existing technical devices for ice production. The features of the author's calculation method, which favorably distinguish it from similar developments, are given. The results of calculations are presented and they are discussed.

Keywords: Ice generation devices; two-phase Stefan problem; mathematical modeling of the processes of heat conduction and convective heat exchange; interphase boundary.

Известно, что системы и средства генерации льда имеют важное значение в пищевой, химической и фармацевтической промышленности. Для сглаживания пиковых нагрузок потребления

холода в системах холодоснабжения предприятий [1], замораживания, хранения и обработки пищевых продуктов [2, 3], усиления ледяного покрытия для проезда транспортных средств [4] и охлаждения рабочих тел в ряде процессов широко применяют льдогенераторы различных конструкций. В то же время, при эксплуатации воздухоохлаждателей [5] и газовых скважин [6] льдо- и гидратообразование носят негативный характер, поскольку вызывают серьезные эксплуатационные затруднения.

Процессы образования и таяния льда традиционно описываются формулировками задачи Стефана [7]. В настоящее время существует большое многообразие подходов к численной реализации данной задачи, наиболее полный обзор, которых содержится в работе [8]. В процессе компьютерной реализации здесь решается нестационарное уравнение теплопроводности и определяется положение межфазной поверхности в каждый дискретный момент времени. Подход авторов к численной реализации двухфазной задачи Стефана, применительно к использованию теплоаккумулирующих материалов в строительстве и теплотехнике [9–11] имеют следующие особенности:

- методика расчета распространяется на расчетные области различной геометрии, в частности, получены результаты расчетов по соотношениям, записанным в декартовой, цилиндрической и сферической системах координат;
- условие Стефана на межфазной границе представляется для вычисления массовой концентрации новой фазы $0 \leq \eta \leq 1$ в расчетном узле, что исключает проблемы, связанные с «делением на ноль» при выравнивании тепловых потоков в рассматриваемой области;
- представляется возможным использование переменных во времени и по пространству внешних условий теплообмена, что позволяет моделировать положение двух и более межфазных поверхностей в расчетной области;
- исследуется влияние напорных и конвективных течений жидкой фазы на интенсивность распространения теплоты и положение межфазной поверхности.

На рис. 1–3 представлены результаты расчета процесса образования льда в коаксиальной области (в полярных координатах r, Θ) в присутствии конвективных течений жидкой фазы.

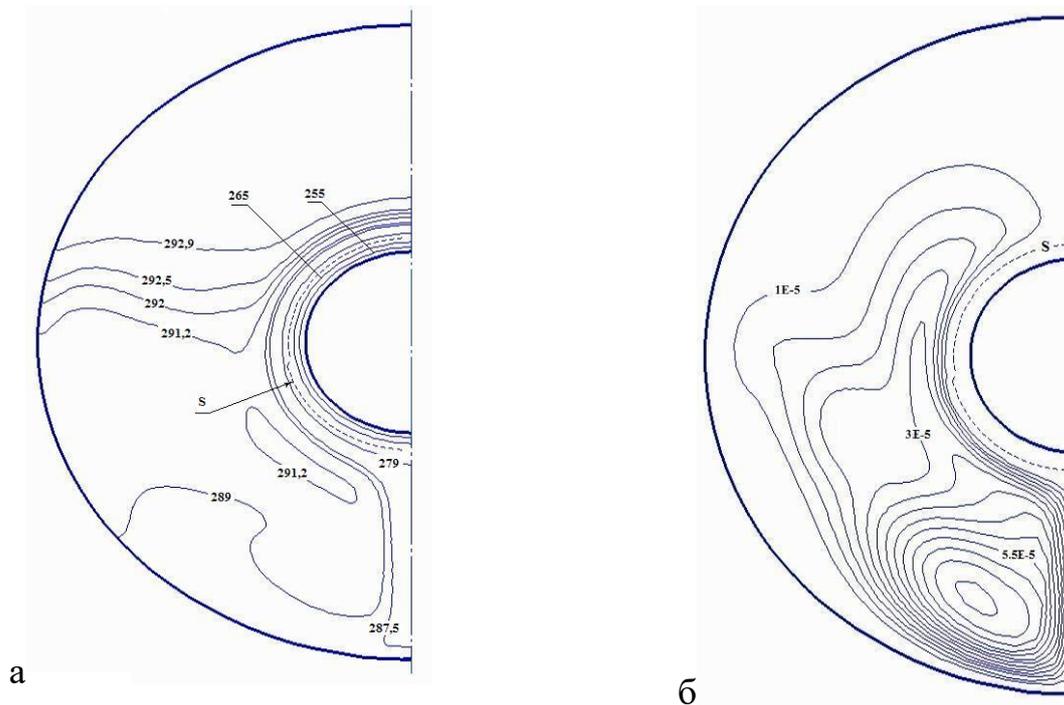


Рис. 1. Положение межфазной границы и распределение изотерм (а) и линий тока воды (б) в момент времени $\tau = 100$ с

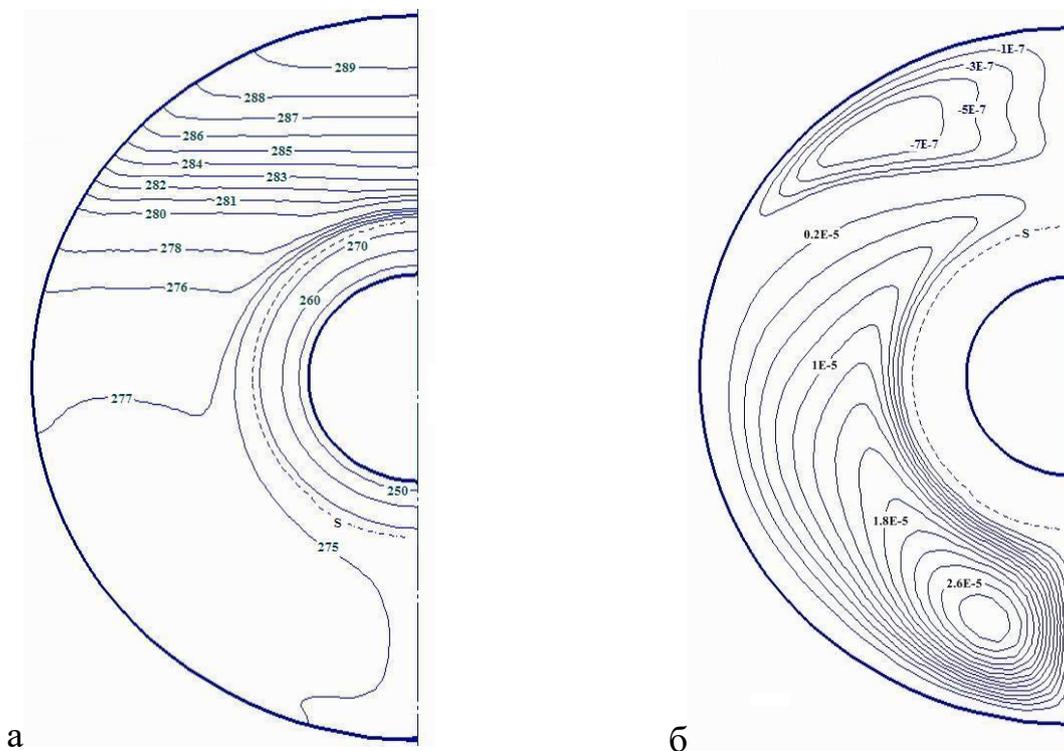


Рис. 2. Положение межфазной границы и распределение изотерм (а) и линий тока воды (б) в момент времени $\tau = 1000$ с

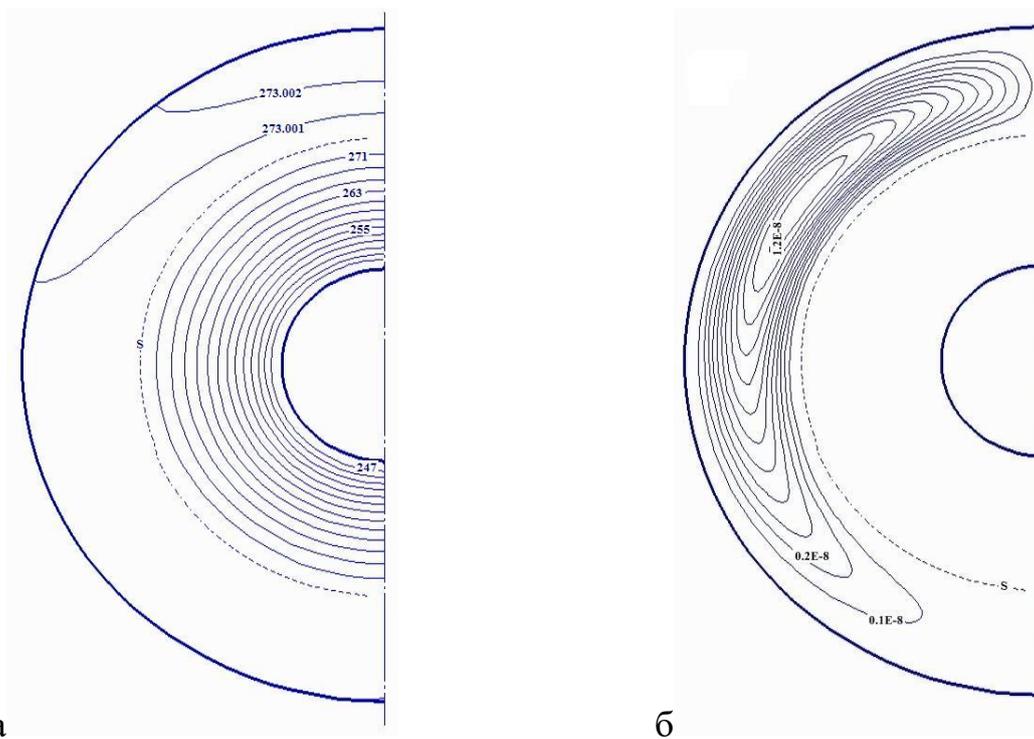


Рис. 3. Положение межфазной границы и распределение температур (а) и линий тока жидкой фазы (б) в момент времени $\tau = 7200$ с

В начальный период (рис. 1) наблюдается ярко выраженная температурная стратификация в жидкой фазе, когда более нагретые слои в результате циркуляции поднимаются в верхнюю часть межтрубного пространства. Это приводит к едва заметному искривлению формы межфазной границы в области $\theta \approx 95^\circ$. При $\tau \approx 300$ с интенсивность конвективных течений воды достигает своего максимального значения, вследствие чего, временно образуется вторичный циркуляционный вихрь (рис. 2), а зона искривления межфазной поверхности смещается в сторону больших значений угла θ . Далее интенсивность циркуляции жидкости начинает снижаться по двум причинам: во-первых, температура подвижной среды принимает в практически во всей области температуру близкую к температуре фазового перехода, а, во-вторых, конвективным потокам приходится располагаться в более стесненных условиях (рис. 3), из-за увеличения объема твердой фазы, изотермы в которой выглядят в виде концентрических окружностей.

Список использованных источников

1. Тимощенко, В. М. Исследование процесса образования льда в аккумуляторе холода с фазовым переходом / В. М. Тимощенко, Г. А. Горбенко, Н. И. Иваненко // Промышленная теплотехника. 2006. Т. 28, № 1. С. 40–46.
2. Белозеров, Г. А. Исследование процесса охлаждения рыбы с использованием бинарного льда / Г. А. Белозеров [и др.] // Холодильная техника. 2012. № 6. С. 37–41.
3. Гунько, П. А. Концентрирование вымораживанием / П. А. Гунько, А. В. Учайкин, А. В. Карчин // Качество продукции, технологий и образования : материалы 7-й Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. Магнитогорск : МиниТип, 2012. С.486–490.
4. Храпов, А. А. Гранулированный лед в строительстве ледовых переправ и зимников / А. А. Храпов, В. И. Полтавцев, А. С. Ащеулова // Вестник Кемеровского государственного сельскохозяйственного института. 2006. № 2. С. 235–242.
5. Семенов, Е. В. Моделирование процесса генерации льда и инея на поверхности воздухоохладителя / Е. В. Семенов, Б. С. Бабакин, М. И. Воронин, М. Ласаро // Вестник Международной академии холода. 2009. № 4. С. 1–6.
6. Аргунова, К. К. Математические модели образования гидратов в газовых скважинах / К. К. Аргунова, Э. А. Бондарев, И. И. Рожин // Криосфера Земли. 2011. Т. XI, № 2. С. 65–69.
7. Самарский, А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М. : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
8. Бородин, С. Л. Численные методы решения задачи Стефана / С. Л. Бородин // Вестник Тюменского государственного университета. 2015. Т. 1, № 3 (3). С. 164–175.
9. Диденко, В. Н. Методика расчета процессов плавления и отвердевания теплоаккумулирующих материалов в мелкодисперсных капсулах / В. Н. Диденко, Р. З. Касимов, Д. Н. Попов // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88, № 1. С. 20–24.
10. Попов, Д. Н. Методика численного моделирования фазовых переходов теплоаккумулирующих материалов, заключенных в двумерный объем / Д. Н. Попов, В. Н. Диденко, Р. З. Касимов // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 1 (25). С. 26–30.
11. Касимов, Р. З. К расчету параметров процессов функционирования фазоменяющих теплоаккумулирующих материалов в составе теплозащитных конструкций / Р. З. Касимов, М. Ф. Хисамутдинов // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 1 (28). С. 74–78.