

УДК 656.614.073.4444(045)

А.Ф. Мошнянский, А.А. Мошнянский, О.А. Чумак

**РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОХЛАЖДЕНИЯ СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ
ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ МОРЕМ**

Приведены результаты математического моделирования процессов охлаждения ряда скоропортящихся грузов (мясо, цитрусовые, бананы, сыр, масло) при перевозке их морем и сопоставлены с экспериментальными значениями. Используются значения эффективных коэффициентов теплопроводности (ЭКТП), теплоотдачи и тепловых потоков. Показано, применительно к каким грузам следует использовать ЭКТП, и даны их конкретные значения.

Ключевые слова: математическое моделирование, скоропортящиеся грузы, температура, эффективный коэффициент теплопроводности, рефрижераторные суда.

У статті наведені результати математичного моделювання процесів охолодження вантажів, які швидко псуються (мясо, цитрусові, банани, сир, масло) при перевезенні їх морем і зіставлені з експериментальними значеннями. Використані значення ефективних коефіцієнтів теплопровідності (ЕКТП), тепловіддачі і теплових потоків. Показано до яких вантажів слід використати ЕКТП і наводяться їх конкретні значення.

Ключові слова: математичне моделювання, швидкопсуючийся вантаж, температура, ефективний коефіцієнт теплопровідності, рефрижераторні судна.

Results from mathematical modeling of cooling processes for a number of perishable goods (meat, citrus, bananas, cheese, butter) during their sea shipping are presented and compared with experimental values. Values of effective thermal conductivity, coefficients heat exchange and heat flows are obtained. It is shown conformably to which goods efficient thermal conductivity should be used. Its concrete values are given.

Keywords: mathematical modeling, perishable goods, temperature, effective coefficients thermal conductivity, refrigerated ships.

Процесс охлаждения груза для холодильной установки судна, наиболее напряженный и требует в ряде случаев использования всей располагаемой холодопроизводительности. Расчет требуемой холодопроизводительности должен быть основан на данных о тепловом состоянии и продолжительности охлаждения каждого конкретного груза. Температурно-влажностные условия транспортировки и скоростной режим рефрижерации определяются требованиями технологии перевозки для каждого вида груза.

© Мошнянский А.Ф., Мошнянский А.А., Чумак О.А., 2016

Сюрвейер, занятый инспекцией продовольственных грузов в процессе их погрузки-выгрузки, в морских портах должен иметь четкие знания в вопросах классификации грузов, методов сохранной перевозки на различных типах судов, подготовки грузов и грузовых помещений к погрузке. Особое внимание сюрвейера сосредоточено при выгрузке продовольственных грузов на их качество.

К скоропортящимся грузам относятся грузы, которые в течение длительного времени могут сохранять свои пищевые и питательные свойства без применения специальных мер обработки, например, консервации [1].

Суда, осуществляющие перевозку режимных грузов, разделяются на рефрижераторные суда с батарейной системой охлаждения грузовых помещений; рефрижераторные суда с воздушной системой охлаждения грузовых помещений и др. Морские перевозки осуществляют на рефрижераторных судах с батарейной системой охлаждения при минимальной вентиляции, что резко снижает потери массы и усушку груза. В замороженном и охлажденном состоянии перевозятся мясо, масла, рыбная продукция и др. Так, например, наиболее ценным мясом считается охлажденное [1].

С момента начала погрузки режимных грузов на судне ведется постоянный контроль за состоянием температуры, влажности трюмного воздуха и режимов работы вентиляционной системы. Данные замеров заносят в специальный рефрижераторный журнал. Именно с контроля записей в рефрижераторном журнале сюрвейер и начинает анализ условий перевозки продовольственных грузов в порту назначения. Во время перевозки рефрижераторных грузов на судне включают самописцы температур, установленных непосредственно за воздухоохладителями и в трюмах. Все фиксируется в рефрижераторном журнале. Сюрвейер имеет право потребовать или сделать соответствующие выписки из температурного журнала.

Ниже рассматривается возможность определения теплового состояния скоропортящихся грузов в период их охлаждения в судовых рефрижераторных помещениях с использованием эффективного коэффициента теплопроводности (ЭКТП), учитывающего все виды теплопереноса. Численные значения ЭКТП определялись из решения инверсных задач методом математического моделирования с использованием экспериментальных данных на судах [2]. Определение ЭКТП применительно к различным грузам сводилось к решению задач нестационарной теплопроводности в одномерной постановке с граничными условиями первого рода при равномерном начальном распределении температур

$$\lambda_{эф} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - C_V \frac{\partial T}{\partial \tau} + q_V = 0, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ – ЭКТП;

T – температура;

x – координата;

C_V – удельная объемная теплоемкость;

τ – время.

В качестве исходных данных принимались температурные поля, полученные при эксперименте в натуральных и лабораторных условиях. Кроме того, известны C_V и $\lambda_{\text{эф}}$, соответствующие кондуктивному переносу. Для грузов, где необходимо учитывать внутреннее тепловыделение, использовалось по аналогии с работой [2] уравнение

$$q_V(T) = q_0 e^{kT}, \quad (2)$$

Значение ЭКТП определялось из уравнения (1) подбором так, чтобы наиболее полно обеспечить совпадение температур, полученных методом математического моделирования (T_M) и в эксперименте ($T_{\text{Э}}$). Таким образом, задача поиска ЭКТП сводилась к минимизации величины

$$\xi = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^m [T_M(x_k, \tau_i) - T_{\text{Э}}(x_k, \tau_i)]^2, \quad (3)$$

где k, i – число экспериментальных точек и фиксированных моментов времени. Выбор оптимальных значений интервалов пространства Δx и времени $\Delta \tau$ осуществлялось последовательным их уменьшением.

В процессе решения инверсных задач определялось влияние ЭКТП на тепловое состояние груза и время его охлаждения. Для контрольных экспериментальных точек в объеме груза определялась ошибка

$$\delta_i = \frac{T_{\text{Э},i} - T_{M,i}}{T_{\text{Э},i}} * 100\%, \quad (4)$$

Средняя ошибка в объеме груза находилась из выражения

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{1}{m} \sum_i^m |\delta_i|, \quad (5)$$

Особый интерес представляют скоропортящиеся грузы с внутренним тепловыделением. После загрузки в трюм в виде прямоугольных штабелей скоропортящиеся грузы, особенно плоды и овощи, требуют интенсивного охлаждения до заданной температуры. Температурное поле

штабеля груза зависит от условий теплообмена с окружающей средой, внутренних тепловыделений, наличия конвективного переноса внутри штабеля. Теплообмен штабеля груза с окружающей средой весьма сложен. Так, для цитрусовых, перевозимых в картонных ящиках массой около 18 кг и укладываемых в штабеля по семь-восемь ящиков, в связи со сложной структурой (разнообразная форма плодов и их размеров, пористость и т. д.) теплоперенос протекает различно (кондуктивный, конвективно-диффузионный, радиационный и др.). Определено влияние ЭКТП на тепловое состояние апельсинов [3]. Средняя ошибка за время охлаждения (шесть суток) приведена ниже:

| | | | | | |
|---------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|
| $\lambda_{эф}$, Вт/(м . К).... | 0,43 | 160 | 290 | 460 | 640 |
| $\delta_{ср}$, % | 82,5 | 6,6 | 4,9 | 0,8 | 3,5 |

Лучше всего согласовались температуры математического моделирования и эксперимента при $\lambda_{эф} = 460$ Вт/(м.К). Значение $\lambda_{эф} = 0,43$ Вт/(м . К) соответствует кондуктивному переносу. Из решения задачи при этом значении $\lambda_{эф}$ следует, что груз не охлаждается, как это происходит в реальных условиях, а нагревается, так как не учитываются теплоперенос через апельсины фильтрацией воздуха, естественной и вынужденной конвекцией, испарением влаги и других факторов.

Полученное среднее значение $\lambda_{эф}$ позволило решать прямые задачи нестационарной теплопроводности для цитрусовых и бананов и сопоставить результаты математического моделирования с экспериментальными данными. При $\lambda_{эф} = 460$ Вт/(м . К) решена задача определения температурного поля в штабеле кубинских апельсинов «Валенсия» при транспортировке на рефрижераторном судне. В качестве граничных условий первого рода принимались значения температур поверхности ящиков в начале и в конце штабеля, полученные в процессе натурального эксперимента.

Для сравнения результатов математического моделирования и натурального эксперимента использовалось экспериментальное изменение температуры в центре ящика.

Проведение натуральных экспериментов на судах в условиях охлаждения грейпфрутов показало, что изменение перепада температур от начала охлаждения до выхода в режим в течение четырех суток по ширине штабеля (левый борт – правый борт) составляло $\Delta T = 1,0-0,2$; по длине штабеля (нос – корма) – $0,8-0,1$; по высоте штабеля (днище – палуба) – $6,0-0,9$ градусов Цельсия. Наиболее существенный перепад температур отмечается по высоте штабеля, что позволяет решать задачу в одномерной постановке. Разбивка по пространству осуществлялась с шагом, равным расстоянию между центрами ящиков. Выбор интервала времени

зависел от характера изменения граничных условий первого рода. Экспериментальное изменение температур на поверхности (начало и конец штабеля) составляло 0,4 – 2,4 град/сут. Значение интервала времени принималось $\Delta\tau = 0,5$ сут. Результаты решения сравнивались с экспериментальными данными, при этом средняя ошибка за время охлаждения в течение рейса (20 суток) составляла 4,7 %.

Рекомендуемое среднее значение ЭКТП $\lambda_{\text{эф}} = 460$ Вт/(м · К) использовано при решении задачи по изменению теплового состояния и времени охлаждения применительно к транспортировке бананов и грейпфрутов. Проводилось сравнение результатов решений с экспериментальными значениями температуры в центре каждого ящика. В качестве максимального значения принималась экспериментальная начальная температура, которая составляла для бананов $T_{\text{max}} = 15,3$, а для грейпфрутов – 14,0 град. Цельсия. Средняя ошибка по объему штабеля за время охлаждения определялась по выражению (5) и составляла для бананов 2,9 (за восемь суток), для грейпфрутов – 1,59 % (за девять суток). Интервал времени принимался таким же, как и для апельсинов.

Грузы без внутренних тепловыделений, такие, как мясо, сыр, масло животное, имеют другие структуры, тепловлажностные характеристики, характер теплообмена с окружающей средой. Сыр и масло по своей структуре более близки к телам, в которых преобладает теплоперенос теплопроводностью. Мясо по своей структуре относится к капиллярно-пористым коллоидным телам, в которых процессы теплопереноса более сложны. Последнее обстоятельство потребовало при решении инверсных задач применять более мелкую разбивку по пространству.

Данные о влиянии $\lambda_{\text{эф}}$ на тепловое состояние полутуши в форме цилиндра для точки на радиусе 0,86 R при толщине $2R = 0,25$ м за время охлаждения полутуши приведены ниже:

| | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|------|-----|
| $\lambda_{\text{эф}}$ Вт/(м · К)..... | 0,475 | 4,75 | 47,5 | 475 | 950 |
| $\delta_{\text{ср}}$, % | 208,6 | 207,2 | 108,3 | 10,9 | 1,9 |
| δ_{max} , % | 812,5 | 800,0 | 276,5 | 17,9 | 6,2 |

Была выбрана точка 0,86 R в качестве характерной, так как она находится вблизи поверхности охлаждения и эксперименты показали присутствие заметных градиентов температуры вблизи этой точки. Наилучшее согласование значений температуры, определенных по результатам математического моделирования и эксперимента, при $\lambda_{\text{эф}} = 950$ Вт/(м · К). Значение $\lambda_{\text{эф}} = 0,475$ Вт/(м · К) соответствует кондуктивному теплопереносу и наибольшей ошибке.

Полученное среднее значение $\lambda_{эф}$ позволило решать прямые задачи нестационарной теплопроводности при охлаждении мяса с целью определения τ_0 и оценки достоверности значения $\lambda_{эф}$ в результате сопоставления с экспериментальными данными. При использовании $\lambda_{эф} = 950$ Вт/(м · К) решались задачи по определению τ_0 и теплового состояния мясных полутуш при двух наиболее характерных режимах охлаждения (число Био $Bi = \alpha R / \lambda = 0,82$ и $1,3$) и в различных условиях.

Расчет времени охлаждения выполнен по двум аналитическим зависимостям, отличающимся принятыми допущениями [4]. Различие результатов расчета по двум зависимостям достигало в среднем 30 %. Отличие от экспериментальных данных весьма существенно и достигает с увеличением длительности охлаждения 60 – 100 %. При решении инверсных и прямых задач нестационарной теплопроводности численным методом применительно к охлаждению мяса принималось $\Delta x = 4,64$ мм, $\Delta \tau = 1-2$ ч. Влияние пространственных интервалов на точность решения инверсных задач весьма существенно. Например, при $\Delta x = 2,0$ мм $\lambda_{эф} = 8,8$ кВт/(м · К); при $4,64 - 0,95$; при $8,0 - 0,68$.

При решении инверсных задач для условий рефрижерации применительно к сыру и маслу животному можно не пользоваться величиной $\lambda_{эф}$. Но для достаточно хорошей оценки времени охлаждения продукта на основе анализа его теплового состояния необходимо решать нелинейную задачу нестационарной теплопроводности или обоснованно выбирать свойства продукта при линейной постановке задачи. Средняя ошибка температурного поля головки сыра прямоугольной формы за время охлаждения $\tau_0 = 18$ ч составила 5,9 при $\lambda_{эф} = 0,54$; 5,0 при 0,27; 3,6 % при 0,405 Вт/(м·К). Относительная ошибка в каждой точке продукта рассчитывалась по зависимости (4), где в знаменатель вместо $T_{э,i}$ подставляли максимальное значение температуры продукта.

Время охлаждения сыра в центре головки прямоугольной формы от 18 до 8 град. Цельсия составляло 20 ч при $\lambda = 0,27$; при 0,405 $\tau_0 = 15$ ч и при 0,54 Вт/(м · К) $\tau_0 = 12,5$ ч.

Для сыра решалась также обратная задача нестационарной теплопроводности в линейной и одномерной постановке с использованием экспериментальных данных изменения температуры на поверхности сыра. По известному температурному полю, которое определялось методом математического моделирования при граничных условиях первого рода, находилось значение удельного теплового потока на поверхности $x = 0$ и $x = H$ из зависимости

$$q(\tau) = - \lambda \frac{dT(\tau)}{dx}, \quad (6)$$

В результате решение задачи было получено, что удельный тепловой поток на входе воздуха в ящик с сыром ($q_{ВХ}$) больше, чем на выходе из него ($q_{ВЫХ}$). По мере охлаждения сыра и уменьшения разности температур поверхности и наружной среды значения $q_{ВЫХ}$ и $q_{ВХ}$ уменьшаются. Величину изменения коэффициента теплоотдачи α между поверхностью сыра (на входе) и наружной средой определяли по зависимости

$$\alpha(\tau) = \frac{q(\tau)}{T_{П}(\tau) - T_{С}(\tau)}, \quad (7)$$

где $T_{П}, T_{С}$ – температуры поверхности сыра и среды.

Выводы. Одной из ключевых проблем транспортного процесса является его многофакторность. В этом случае становится актуальным, какие факторы и в какой степени оказывают влияние на продукцию на отдельных этапах транспортировки груза, и приводят к снижению качества товара и потери его количества. Роль грузового сюрвея в единой транспортно-логистической цепи в системе мультимодальных перевозок и появление новой сервисной функции сюрвея показаны в [5].

Для определения и прогнозирования теплового состояния и времени охлаждения мяса, штабеля цитрусовых и бананов при их транспортировке рефрижераторными судами может быть использована математическая модель нестационарной теплопроводности с вводом ЭКТП.

Решение аналогичных задач для штабеля сыра и масла животного следует осуществлять в нелинейной постановке. Численные значения тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи, полученные из решения обратных задач для сыра, могут быть использованы в качестве граничных условий III рода.

Прогнозирование изменения штабеля скоропортящихся грузов позволяет определить длительность охлаждения груза и оценить соответствие расчетной холодопроизводительности фактически необходимой, эффективность работы охлаждения и всей холодильной установки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Снопков В.И. *Руководство по проведению сюрвейерских работ на транспорте.* – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2005. – 656 с.
2. Мошнянский А.Ф., Стефанович В.В. *Математическое моделирование процессов охлаждения скоропортящихся грузов при перевозке рефрижераторными судами // Всесоз. науч.-техн. конф. «Современное состояние и перспективы развития кондиционирования воздуха на судах»: Тез. докл.* – Николаев, НТО, 1984. – С. 27.

3. Мошнянский А.Ф., Стефанович В.В. Использование эффективного коэффициента теплопроводности для решения задач охлаждения скоропортящихся грузов // Научн.-прикладн. журнал: Промышленная теплотехника. – Т. 9. – № 3. – К.: Наукова думка, 1987. – С. 64-69.
4. Бражников А.М., Карпычев В.А., Палеев А.И. Аналитические методы исследования процессов термической обработки мясопродуктов. – М.: Пищ. пром-сть, 1974. – 230 с.
5. Мошнянский А.А., Мошнянский А.Ф., Чумак О.А. К вопросу подогрева пищевых грузов на танкерах при участии сюрвейерских компаний и создателей логистической сети // Зб. наук. праць: Методи та засоби управління розвитком транспортних систем. – Вип. 18. – Одеса: ОНМУ, 2011. – С. 182-194.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2016

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **В.Г. Івановський**

доктор технічних наук, професор кафедри «Судноремонт» Одеського національного морського університету **В.П. Сторожев**