



Теоретико-практическая разработка модели и её использование при оценке сроков перевозки замороженных продуктов на железнодорожном транспорте в вагонах-термосах.

А.Г. Лексин, А.В. Моргунов, В.Н. Демин, Е.В. Тимошенкова

ФГУП ВНИИЖГ Роспотребнадзора, Москва, Россия

Актуальным на сегодняшний момент является вопрос о перевозках замороженных продуктов (мяса, птицы, рыбы т.д.) железнодорожным транспортом, а именно о перевозках в вагонах изотермического типа без систем охлаждения, т.е. в вагонах-термосах, при обязательном соблюдении предельных сроков доставки данных грузов согласно правил перевозки на ж.д. транспорте.

В практике эксплуатации вагонов-термосов, прежде всего, возникает вопрос о допустимой продолжительности периода перевозки замороженных продуктов (без использования систем охлаждения), при котором не происходит повышения температуры, приводящего к их порче.

Решением вопроса о практической и экономической целесообразности таких перевозок применительно к конкретным условиям транспортировки (внешние климатические условия) является оценка скорости нагрева (размораживания) продуктов, которая требуется для определения допустимой продолжительности транспортировки в вагоне-термосе.

В целях моделирования процессов, происходящих как внутри, так и снаружи вагона-термоса в процессе перевозки замороженных продуктов, сотрудниками лаборатории испытаний новой техники ЛИИТ ФГУП ВНИИЖГ Роспотребнадзора были проведены как теоретические, так и практические исследования, задачей которых явилось определение скорости нагрева воздуха в вагоне-термосе при использовании имитатора глубокозамороженных продуктов (замороженная вода) с целью дальнейшей оценки на основе полученных данных предельных сроков перевозки замороженных и охлаждённых скоропортящихся грузов в вагоне-термосе в летний и переходный периоды года.

Теоретическая часть вопроса заключалась в разработке базы, позволяющей спрогнозировать скорость нагрева имитатора в зависимости от ряда переменных факторов, таких как:

- ◆ Масса перевозимого продукта
- ◆ Теплоёмкость продукта
- ◆ Коэффициент теплопередачи конструкции
- ◆ Укладка продукта внутри

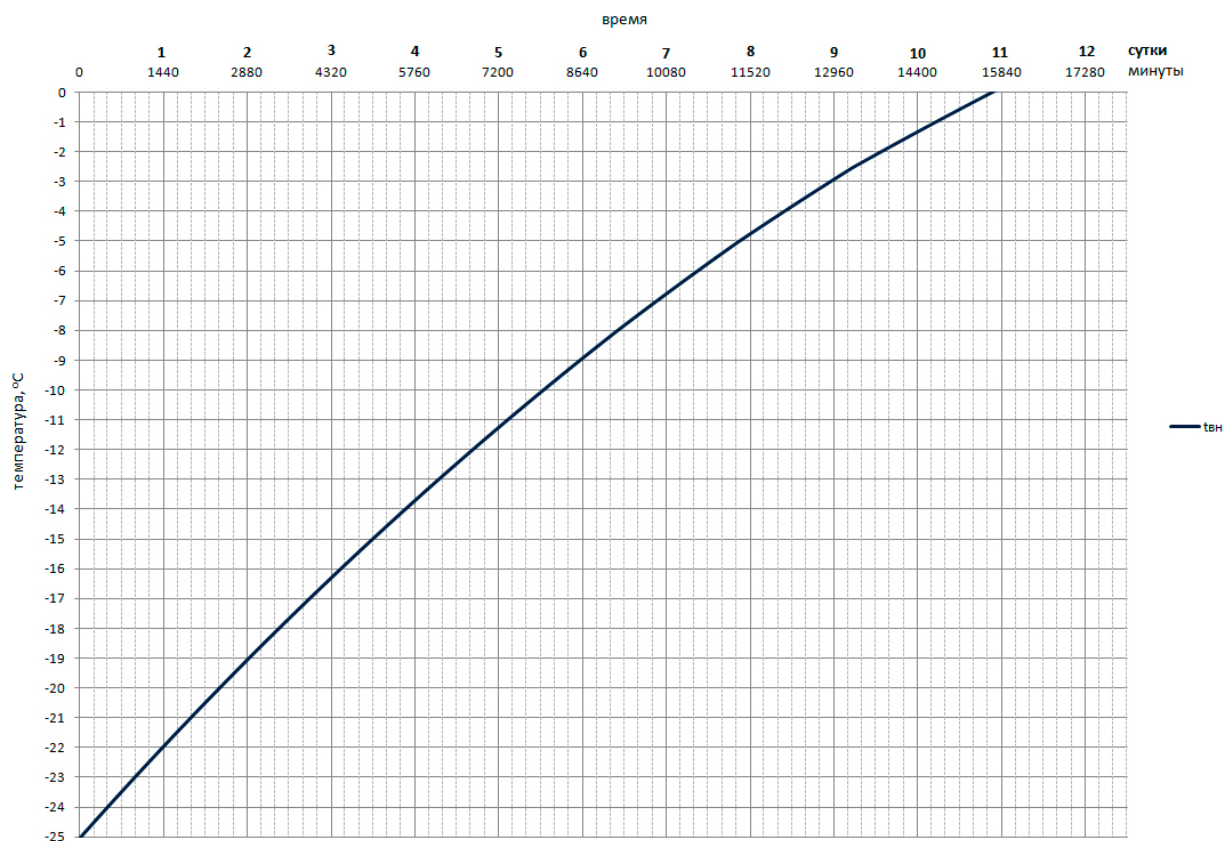
- ◆ Температура замороженного продукта
- ◆ Условия наружной среды (температура, солнечная радиация, скорость движения воздуха).

В процессе разработки теоретической базы были решены задачи:

1. Было сформулировано теоретическое дифференциальное уравнение нестационарного теплообмена (процесса нагрева льда) в общем виде.
2. Решён вопрос о приведении теплоёмкости различных замороженных продуктов к необходимой массе имитатора на основе теплоёмкости.
3. Решена задача расчёта среднесуточной температуры снаружи вагона для различных условий эксплуатации и региона эксплуатации (амбиентная температура).

Таким образом, частным решением дифференциального уравнения нестационарного теплообмена является кривая нагрева замороженного мяса, представленная на рисунке 1, рассчитанная исходя из условий перевозки 60 тонн в вагоне-термосе со средним коэффициентом теплопередачи поверхности кузова $0,25 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ для региона перевозки Владивосток-Новосибирск (рассчитана ambiентная температура самого жаркого летнего месяца).

Рисунок 1 – кривая нагрева замороженного мяса внутри вагона-термоса.



После разработки теоретической базы и построения кривой нагрева замороженного мяса был проведён натурный эксперимент с целью практического подтверждения теоретических основ и возможной корректировки коэффициентов, характеризующих особенно-

сти укладки груза и коэффициента термического сопротивления упаковки, в которой перевозятся замороженные продукты. Для проведения натурального эксперимента был выбран имитатор замороженных продуктов - лёд (замороженная вода в пластиковых ёмкостях, в количестве 46 тонн согласно расчёта на основе теплоёмкости) с начальной температурой заморозки -25°C , который был равномерно загружен в вагон-термос таким образом, чтобы оставался зазор вдоль стен вагона (между льдом и стенкой вагона зазор варьировался в пределах 5-10 см). Загрузка и установка в вагоне льда производилась на паллетах.

Для регистрации показаний температур внутри вагона-термоса и снаружи были установлены датчики, в соответствии со схемой представленной на рисунке 2. Измерения наружной и внутренней температуры воздуха, а также температуры льда производились непрерывно в течение всего времени эксперимента (12 суток) с частотой не реже 1 замер в 10 минут. Полученные по результатам испытаний экспериментальные кривые нагрева воздуха и льда внутри вагона-термоса представлены на рисунке 3.

Рисунок 2 – Схема размещения датчиков внутри вагона – термоса.

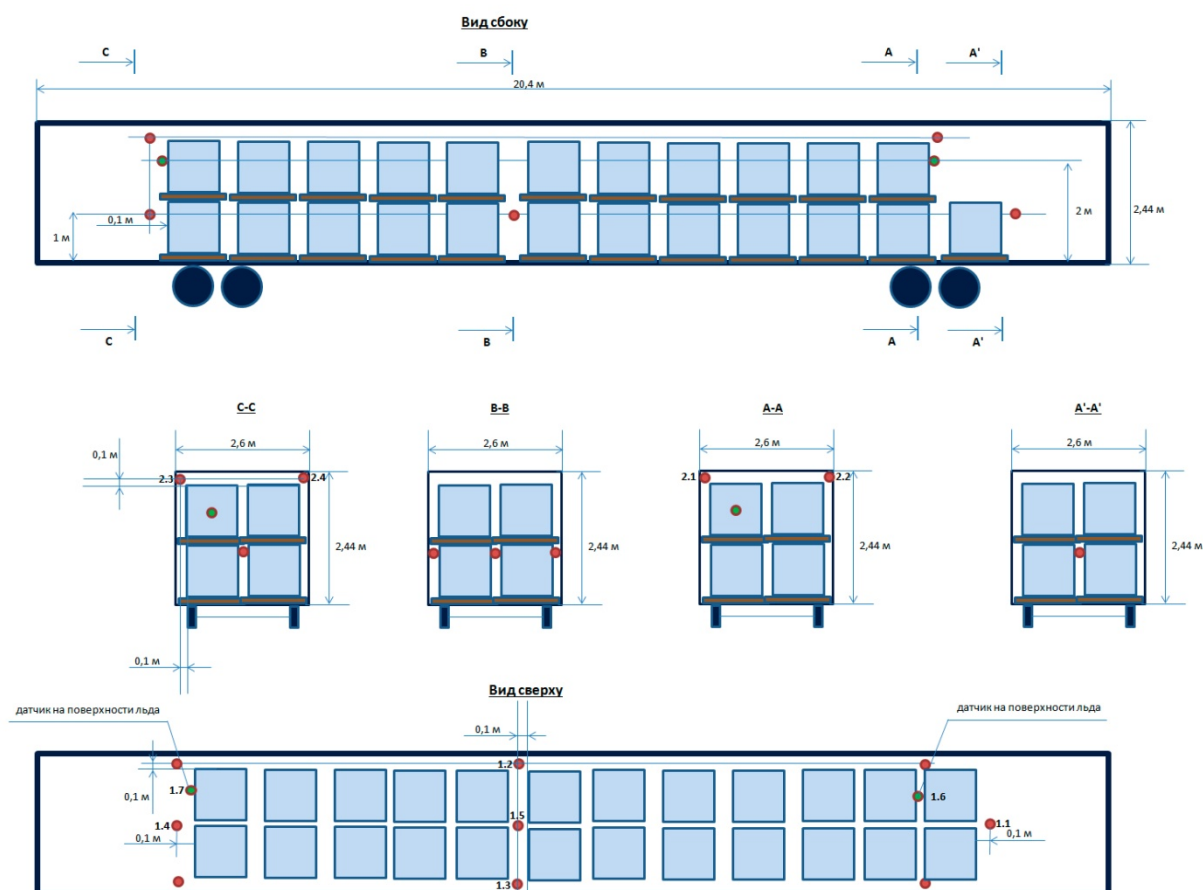
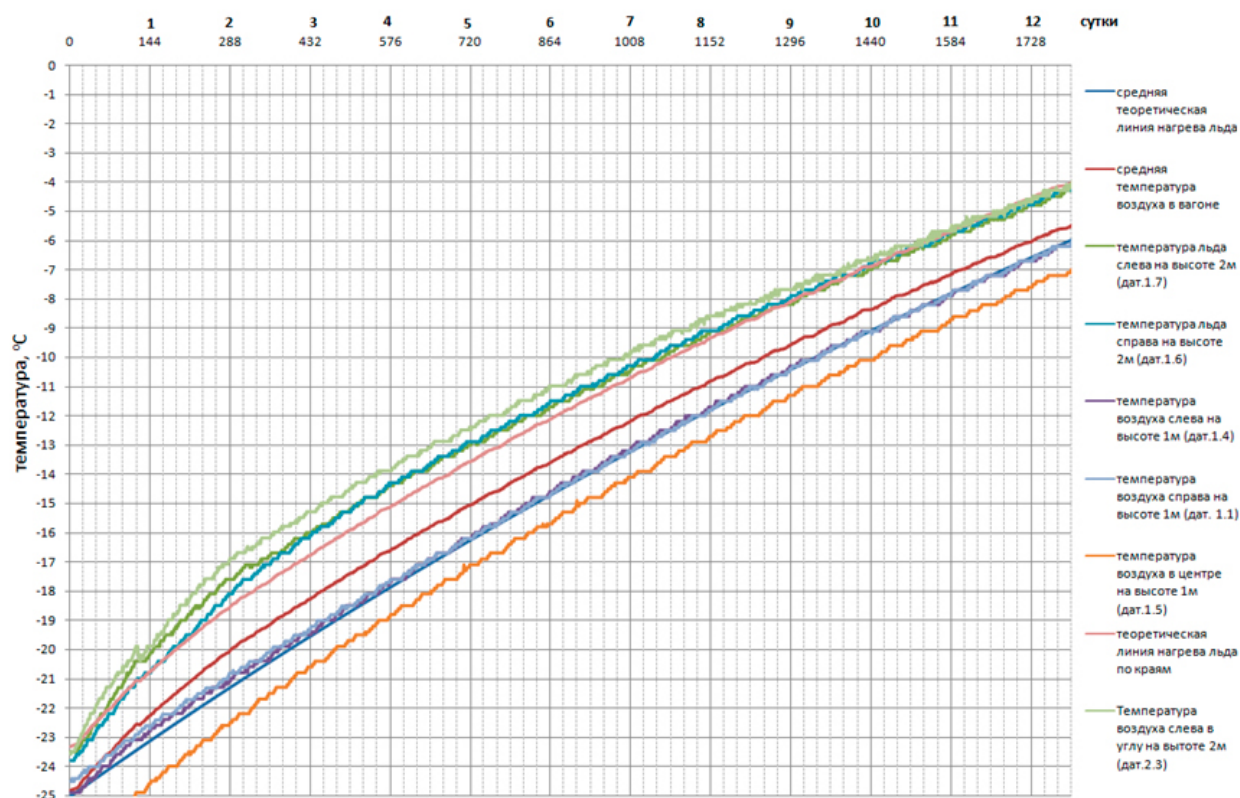


Рисунок 3 – экспериментальные кривые нагрева воздуха и льда



Из полученных экспериментальных кривых нагрева видно, что температура поверхности льда с краю на высоте 2м от пола всегда имеет наивысшее значение, т.е. данная поверхность льда является наиболее термически нагруженной в результате конвективных восходящих потоков теплого воздуха у внутренних стенок вагона. Кривые нагрева воздуха у стенки вагона на высотах 1м и 2м в некоторой степени отличаются.

Однако, как видно из рисунка 3, средняя теоретическая линия нагрева льда, которая отражает повышение средней температуры всей массы льда (46 тонн) полностью совпадает с температурами воздуха на высоте 1м по торцам вагона.

Таким образом, проведенный эксперимент доказал, что температуры воздуха в торцах вагона-термоса на высоте 1м от пола полностью совпадают со средней теоретической линией нагрева льда.

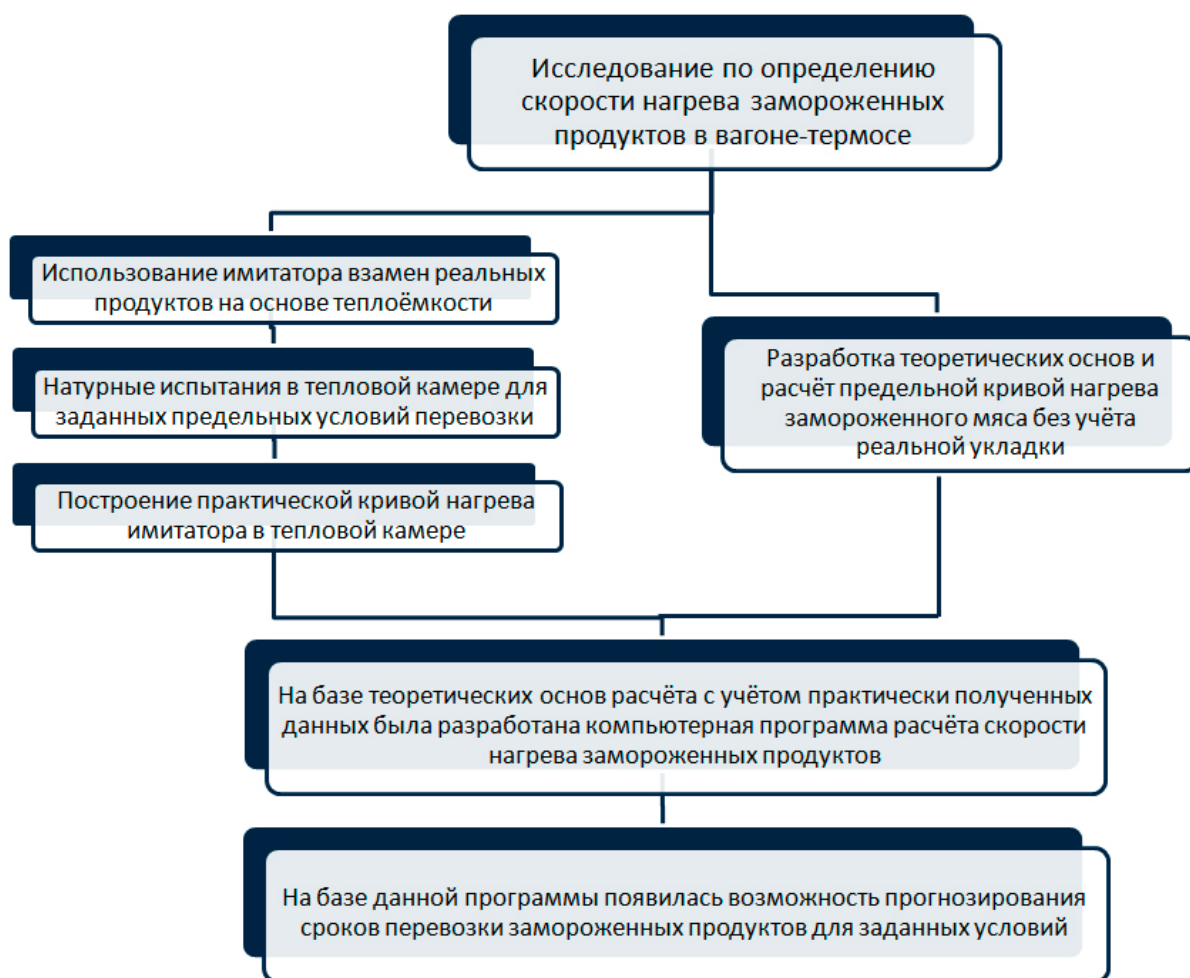
Однако, при оценке скорости нагрева льда (скорости его размораживания) считаем необходимым ориентироваться на температуры наиболее «нагреваемых» участков льда.

По результатам измеренных температур на поверхностях льда такие «нагреваемые» участки расположены на высоте 2м. Для аппроксимации линии нагрева льда на высоте 2м был введен поправочный коэффициент в $1,5^{\circ}\text{C}$ для существующей кривой "средняя теоретическая линия нагрева льда". Результат аппроксимации представлен на рисунке 3, где можно видеть кривую "теоретическая линия нагрева льда по краям", которая довольно точно отражает процесс нагрева льда в наиболее теплонагруженных точках вагона. Имен-

но на нее необходимо ориентироваться при определении допустимой продолжительности транспортировки замороженных грузов в вагоне-термосе.

Исходя из того факта, что все замороженные грузы имеют свою удельную теплоемкость, а также их транспортировка может осуществляться в различных климатических условиях и характеристики вагонов, используемых для целей перевозки, могут быть различны - для каждого случая необходимо обязательно проводить расчет с учетом указанных особенностей. Для этого, на основе разработанной теоретической модели и полученной экспериментальной базе сотрудниками лаборатории ЛИНТ ФГУП ВНИИЖГ Роспотребнадзора была разработана компьютерная программа моделирования кривых нагрева для различных замороженных продуктов в вагоне-термосе, позволяющая определить время достижения нормируемых предельных температур замороженных продуктов, а следовательно и предельные сроки перевозки. В графическом виде процесс исследования представлен на рисунке 4.

Рисунок 4 - Блок-схема процесса проведения исследования.



Для расчета времени нагрева любых замороженных продуктов и построения кривой нагрева в компьютерную программу необходимо ввести следующие данные:

- коэффициент теплопередачи ограждений вагона-термоса, $\text{Вт/м}^2\text{К}$;
- площадь поверхности ограждений вагона-термоса, м^2 ;
- толщина воздушной прослойки внутри вагона при укладке замороженного груза, м;
- масса замороженного груза, кг;
- удельная теплоемкость замороженного груза, кДж/(кгК) ;
- амбиентная температура наружного воздуха, рассчитанная исходя из региона эксплуатации для данного типа используемого вагона-термоса, включающая в себя солнечную инсоляцию и среднюю подвижность воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Результатом компьютерной обработки исходных данных является зависимость изменения температуры поверхности замороженного груза от времени при воздействии заданной амбиентной температуры наружного воздуха. По полученной зависимости определяется время нагрева замороженного продукта до предельной нормируемой температуры на его поверхности (в наиболее «нагреваемых» участках) и следовательно, допустимая продолжительности его транспортировки в вагоне-термосе.

В качестве примера проведен расчет при помощи программы моделирования для замороженной говядины в тушах и полутушах с загрузкой в 60т в вагон-термос, с коэффициентом теплопередачи кузова не более $0,25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, с температурой загрузки -25°C для дорог РЖД с температурой наружного воздуха летом до $+31^{\circ}\text{C}$. Результаты расчетов представлены на рисунке 5. Так, например, замороженная говядина в тушах нагреется в вагоне-термосе до температуры -8°C за 283 часа, что составляет 11,8 суток.

Рисунок 5 - Кривая нагрева замороженной говядины в тушах и полутушах с загрузкой в 60т, температурой загрузки -25°С для дорог РЖД, созданный при помощи программы моделирования предельных кривых нагрева замороженных продуктов в вагоне-термосе.



Таким образом, в результате проделанной работы были произведены:

- ◆ Постановка задачи, определение критериев оценки, разработка концепции;
- ◆ Разработка теоретической базы, проведение теоретического исследования;
- ◆ Определение методов и подходов к проведению практического исследования, написание программы проведения исследования и её практическая реализация;
- ◆ Создание единой модели процесса на базе теоретического и практического исследования;
- ◆ Создание компьютерной программы, позволяющей моделировать процессы нагрева для любого частного случая.

Ввиду всего вышесказанного, была проделана сложнейшая полномасштабная работа, объединяющая теоретические знания и практические данные, имеющая важнейший практический выход, позволяющий моделировать процессы перевозок замороженных и скоропортящихся продуктов в реальном времени. Также данная модель может быть аппроксимирована и применена для процессов перевозки подогретых продуктов в зимний

период года в том числе и подогретых скоропортящихся продуктов либо продуктов с повышенными требованиями к температуре в процессе перевозки.

Важнейшим результатом проведённой практической-исследовательской работы является законченный готовый продукт в виде компьютерной программы, позволяющей моделировать процесс нагревания продуктов во время их перевозки в вагоне-термосе для определения предельных сроков перевозки любых продуктов. Данное исследование носит важнейшую практическую ценность и должно применяться в дальнейшем и являться фундаментальной основой при написании рекомендаций, разработки соответствующих распоряжений и нормативных документов в сфере перевозки продовольственных грузов.

Литература

1. Правила перевозки грузов на ж.д. транспорте. Перечень, предельные сроки и условия перевозок грузов в вагонах-термосах с общим коэффициентом теплопередачи кузова $K=0,25 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.
2. ТУ 3182-001-17016910-2015.
3. Б.Н. Китаев Теплообменные процессы при эксплуатации вагонов, М. Транспорт, 1984.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
6. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. - 344 с.