

УДК 621.565.924 : 532.5 : [641.456.3 : 658.871](470.21)

Теоретические и экспериментальные исследования утечки холодного воздуха в шкафах-витринах супермаркетов

Б.В. Голубев¹, А.В. Шутов¹, И.Г. Кобылянский^{1,2}

¹ Технологический факультет МГТУ, кафедра технологического и холодильного оборудования

² Инженерно-экономический факультет Мурманского филиала Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций, кафедра портовой подъемно-транспортной техники и гидротехнического строительства

Аннотация. В статье представлены данные теоретических и экспериментальных исследований утечек холодного воздуха при проведении температурных испытаний и испытаний на оттаивание шкафов-витрин холодильных установок супермаркетов.

Abstract. In the paper the data of theoretical and experimental researches of cold air outflow from shop-window cases have been considered. Temperature tests and tests for thawing of shop-window cases of refrigerating units in supermarkets have been carried out.

Ключевые слова: шкаф-витрина холодильной установки (модель и натура), имитаторы рыбы – деревянные бруски, термопары, утечка холодного воздуха, массообмен, массоотдача

Key words: shop-window case of refrigerating unit (model and nature), fish simulators – wood pieces, thermocouple, outflow of cold air, mass exchange, mass transfer

1. Введение

В 2005 году в Мурманском рыбном супермаркете ОАО "Норд Вест ФК" в соответствии с просьбой Мурманского арбитражного суда преподавателями кафедры технологического и холодильного оборудования и кафедры судовых энергетических установок Мурманского государственного технического университета были проведены согласно ГОСТа 23833-95 температурные испытания и испытания на оттаивание двух шкафов-витрин марок Z86-3 и Z86-4 испанской фирмы КОХКА (ГОСТ 23833-95, 1995).

В соответствии с ГОСТ 23833-95 эти испытания должны были быть произведены не на мороженой рыбе в полиэтиленовых пакетах в вакуумной упаковке, а на имитаторах рыбы – деревянных брусочках. В деревянных брусках необходимо установить 18 хромель-копелевых термопар, спаи каждый из которых, согласно ГОСТа 23833-95, должны быть заключены между двумя пакетами, наполненными смесью древесных опилок и слабого солевого раствора. Для выполнения всех требований по ГОСТ 23833-95 пришлось проделать большую подготовительную работу – заготовить 600 кг древесных брусков; распилить их в соответствии с размерами полок шкафов-витрин; изготовить 36 картонных коробок размером 100×100×10 мм и заполнить их смесью древесных опилок и слабого солевого раствора; поместить спаи 18 термопар между двумя пакетами и связать эти пакеты скотчем. Для выполнения всех требований ГОСТ 23833-95 пришлось произвести выгрузку из двух шкафов-витрин всей мороженой рыбы и на тележках отвезти в подвальное помещение, где рыба была уложена в камеры хранения с температурой воздуха -18÷-20 °С. Как видно, необходимо было выполнить большой объем работ (Голубев и др., 2007).

2. Расчет утечек холодного воздуха при проведении температурных испытаний и испытаний на оттаивание шкафов-витрин холодильных установок

Нам представляется возможным, что все эти ненужные работы можно было бы избежать, если расширить действие ГОСТа 23833-95, т.е. сделать его состоящим из двух частей – первая часть – это проводить испытания на деревянных брусках и пакетах с опилками и слабым солевым раствором. Эти испытания удобно проводить, когда проводятся приемо-сдаточные испытания после монтажа холодильной машины и холодильных шкафов-витрин. Вторая часть ГОСТа 23833-95 должна применяться, когда шкафы-витрины заполнены пакетами мороженой рыбы и уже проводилось ее хранение в шкафах-витринах. При открывании дверей шкафов-витрин покупателями, чтобы взять

мороженую рыбу, холодный воздух, имеющий большую плотность при температуре $-18 \div -25$ °С, через низ проема открытой двери выходит наружу, а его место сверху шкафа-витрины заполняется теплым воздухом магазина. Обычно температура теплого воздуха магазина бывает не ниже $+18 \div +24$ °С.

Поступивший в шкаф-витрину теплый воздух смешивается с холодным, а затем на ребренных поверхностях воздухоохладителя частично охлаждается, и опускаясь вниз дополнительно охлаждается о поверхности пакетов с мороженой рыбой. Как видно, при открывании двери возникает достаточно сложный массо- и теплообмен между холодным воздухом шкафов-витрин и теплым воздухом самого магазина.

Для того, чтобы можно было рассчитать средние температуры холодного воздуха в шкафах-витринах рыбных магазинов и супермаркетов в зависимости от частоты открывания дверей покупателями мороженой рыбы в вакуумной упаковке, нами была смонтирована модель секции шкафа-витрины из органического стекла в масштабе 1:3,45 (см. рис.).

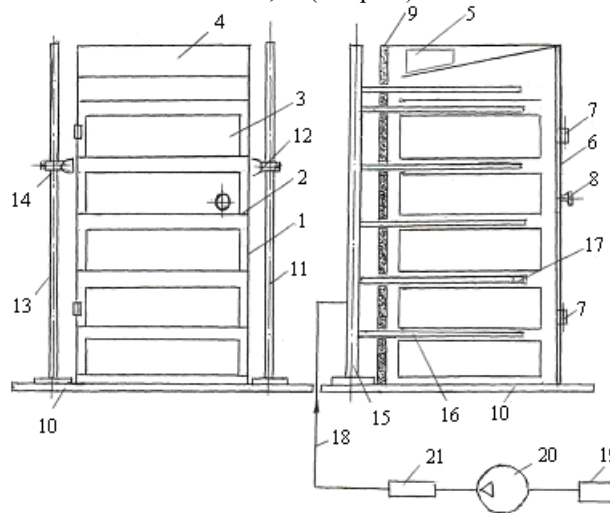


Рис. Устройство для обнаружения утечки охлажденного воздуха в модели холодильного шкафа-витрины: 1 – модель; 2 – полки; 3 – имитаторы мороженой рыбы; 4 – противни; 5 – наклонный щит; 6 – дверь; 7 – петли; 8 – дверная ручка; 9 – изоляционное ограждение; 10 – панель; 11 – вертикальная стенка с ползуном; 12 – фотоэлемент; 13 – вертикальная стойка; 14 – ползун; 15 – ресивер; 16 – горизонтальные трубки; 17 – конические трубки; 18 – гибкий шланг; 19 – воздушный фильтр; 20 – воздушный компрессор; 21 – дымогенератор

Воздухоохладитель и штабели мороженой рыбы в данной модели шкафа-витрины являются имитаторами, изготовленными в этом же масштабе, и представляют собой противни из металлической сетки, внутри каждой из них были расположены полиэтиленовые пакеты, заполненные водным раствором хлористого кальция, температура которых перед теплотехническими испытаниями была в морозильном аппарате понижена до -25 °С. За счет холода имитаторов пакетов с рыбой и воздухоохладителя воздуха в модели шкафа-витрины температура воздуха понижалась до $-18 \div -20$ °С за 15-20 минут. Однако для того, чтобы холодный воздух, вытекающий при открывании дверей, был виден, данная модель шкафа-витрины была также оборудована устройством (рис.), патрубки этого устройства вварены в зазоры между полками с имитаторами рыбы, и через эти патрубки подавался дым от дымогенератора малых размеров. Данные дымогенераторы были разработаны авторами и защищены двумя патентами (патент № 93629 от 10 мая 2010 г. и патент № 97036 от 27 августа 2010 г.) (Голубев и др., 2010).

ГОСТ 23833-95 предусматривает также проведение теплотехнических испытаний холодильных шкафов-витрин при открывании всех дверей с определенным циклом (десять секунд одна дверь открыта и шесть минут закрыта). Однако, когда дверей в шкафу-витрине – шесть, открывание всех дверей в течение 10 часовых теплотехнических испытаний – работа весьма трудная и может оказаться не всем теплотехникам под силу. С целью определения реальной частоты открывания в шкафах-витринах магазина-супермаркета ОАО "Норд Вест ФК" нами в течение 3 месяцев проводилось хронометрирование частоты открывания шкафов-витрин, в результате чего было установлено, что максимальная частота открывания дверей покупателями не превышает $8 \div 9$ раз в час, и только в двух случаях в одном из шкафов-витрин были открыты почти одновременно две двери.

Было также установлено, что при частом открывании дверей шкафов-витрин средняя температура холодного воздуха во всех шкафах-витринах повышалась. А в тех шкафах-витринах, которые очень редко открывались покупателями (хранение в шкафу-витрине дорогой деликатесной мороженой рыбы), температура воздуха была $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже.

Частоту открывания дверей шкафов-витрин определили по формуле:

$$v = 3600/\tau_{\text{ц}}, \quad (1)$$

где v – частота открывания дверей шкафов-витрин, ч^{-1} ; $\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{откр}} + \tau_{\text{закр}}$ – период цикла, с; $\tau_{\text{откр}}$ – период времени открывания шкафов-витрин, с; $\tau_{\text{закр}}$ – период времени закрытой двери, с.

В результате проведения хронометрирования открывания-закрывания шкафов-витрин покупателями было установлено, что частоты v колеблются в пределах от 6 до 18 ч^{-1} , а частота, полученная по данным ГОСТ 23833-95, составляет $9,73\text{ ч}^{-1}$.

В связи с тем, что нами было принято решение исследовать утечки холодного воздуха из шкафов-витрин при открывании дверей покупателями не на натуральных шкафах-витринах в магазинах, а на модели, которая была сделана в масштабе 1:3,45, прежде всего надо было установить насколько изменяется время проведения открываний и закрываний дверей по отношению к рекомендациям ГОСТ 23833-95. Время открывания и закрывания дверей модели шкафа-витрины можно определить с помощью критерия гомохронности, который представляет собой безразмерное время развития или проявления процесса. В нем линейная величина l должна наиболее существенно характеризовать пространство, в котором протекает процесс. Критерий гомохронности идентичен и для модели, и для природы:

$$H_o = \frac{v_n \tau_n}{l_n} = \frac{v_m \tau_m}{l_m} = idem, \quad (2)$$

где H_o – критерий гомохронности; v_n, v_m – скорость утечки холодного воздуха в натурном объекте и на модели, м/сек; τ_n, τ_m – время протекания процесса в натуре и на модели, сек; l_n, l_m – линейные геометрические размеры сходственных (подобных) сторон природы и модели, м.

Для расчета времени открывания, закрывания модели шкафа-витрины необходимо составляющие параметры выразить через известные величины. Например, через известную величину λ – являющуюся масштабом геометрического подобия природы и модели шкафа-витрины. Функционально можно представить критерий гомохронности уравнением (3):

$$H_o = f(\lambda). \quad (3)$$

Для выражения скорости v в функции линейного масштаба геометрического подобия можно использовать критерий Фруда

$$F_r = \frac{v_n^2}{gl_n} = \frac{v_m^2}{gl_m} = idem, \quad (4)$$

где v_n и v_m – скорость движения холодного воздуха в натурном и модельном шкафах-витринах, м/сек; l_n и l_m – линейные геометрические размеры подобных сторон природы и модели, м; g – ускорение силы тяжести одинаковы для природы и модели, поэтому могут быть сокращены в уравнении (4).

После сокращения уравнение (4) принимает вид:

$$\frac{v_n^2}{l_n} = \frac{v_m^2}{l_m} = idem. \quad (5)$$

Уравнение (5) мы приводим к такому виду:

$$\frac{v_n^2}{v_m^2} = \frac{l_n}{l_m}.$$

В этом уравнении отношение l_n/l_m обозначим через λ . Это линейный масштаб геометрического подобия природы и модели шкафа-витрины.

$$v_n^2/v_m^2 = \lambda \text{ или } v_n = v_m \sqrt{\lambda}. \quad (6)$$

Используя в критериальном уравнении H_o гомохронности (2), значение скорости из уравнения (6) получаем:

$$\frac{v_m \sqrt{\lambda} \tau_n}{l_n} = \frac{v_m \tau_m}{l_m} = idem, \quad (7)$$

из выражения (7) получаем:

$$\frac{\tau_n}{\tau_m} = \frac{v_m \sqrt{\lambda}}{v_m} \cdot \frac{l_n}{l_m} = idem, \quad (8)$$

после сокращения v_m уравнение (8) примет вид:

$$\frac{\tau_n}{\tau_m} = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\lambda}, \quad (9)$$

откуда получаем:

$$\tau_n = \tau_m \sqrt{\lambda}. \quad (10)$$

Уравнение (10) позволяет определить время продолжительности открывания двери модели, выразив ее через время продолжительности открывания и закрывания модели шкафа-витрины. В ГОСТ 23833-95 время продолжительности открывания-закрывания двери натурального шкафа-витрины имеется. Кроме того, эта продолжительность нами получена в результате хронометрирования открывания и закрывания натуральных шкафов-витрин в супермаркете ОАО "Норд Вест ФК" в ноябре-декабре 2007 года.

Для утечки холодного воздуха при открывании-закрывании двери модели шкафа-витрины важно получить критериальное уравнение для расчета или пересчета массопереноса. Для решения этого вопроса необходимо выяснить условия массопереноса холодного воздуха при открывании дверей шкафов-витрин в магазинах покупателями деликатесной мороженой продукции.

Массообмен в шкафах-витринах протекает в пределах одной фазы перемещения теплого и холодного воздуха. Холодный воздух при открывании дверей шкафов-витрин покупателями перемещается вниз проема открытой двери, и так как плотность холодного воздуха при температурах $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже намного выше плотности воздуха вне шкафа-витрины, то есть в магазине, ядром фазы воздуха будет теплый воздух, а его масса вне магазина значительно больше, чем у холодного воздуха, и в результате многочисленных открываний и закрываний дверей модели шкафа-витрины весь холодный воздух выйдет наружу и будет замещен теплым воздухом, находящимся в ядре, т.е. воздухом магазина с температурой $+20\div+24\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Уравнение расхода капельной жидкости можно распространить и на расход газа или воздуха:

$$W_e = \omega v, \quad (11)$$

где W_e – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; ω – площадь живого сечения, через которое холодный воздух через низ проема открытой двери покидает шкаф-витрину, м^2 ; v – средняя скорость утечки холодного воздуха, $\text{м}/\text{с}$.

Расход холодного воздуха мы должны выразить также в функции λ , т.е. выражением:

$$W_e = f(\lambda). \quad (12)$$

Уравнение расхода модели и природы мы можем выразить следующим критериальным уравнением:

$$\frac{W_{e.n.}}{W_{e.m.}} = \frac{\omega_n v_n}{\omega_m v_m}. \quad (13)$$

Уравнение (13) можно выразить через вышеприведенные уравнения:

$$\frac{W_n}{W_m} = \frac{\ell_n^2}{\ell_m^2} \cdot \frac{v_m \cdot \sqrt{\lambda}}{v_m} = \lambda^2 \sqrt{\lambda}. \quad (14)$$

Из этого выражения расход холодного воздуха природы шкафа-витрины выразить через расход холодного воздуха в модели:

$$W_n = W_m \cdot \lambda^2 \sqrt{\lambda}. \quad (15)$$

Уравнение (15) необходимо для пересчета расхода холодного воздуха с природы на модель и наоборот.

Испытание модели шкафа-витрины при открывании-закрывании двери по ГОСТ 23833-95 и по данным хронометрирования открывания дверей шкафов-витрин в супермаркете ОАО "Норд Вест ФК" покупателями позволили получить частоты открывания, которые были использованы на модели шкафа-витрины с целью установления зависимости полного удаления холодного воздуха от этих частот открывания-закрывания и замены объема воздуха в модели теплым воздухом ядра, то есть теплым воздухом вне модели шкафа-витрины.

Полное удаление холодного воздуха в смеси с дымом определялось тремя способами:

1. Визуально по полному удалению дыма с холодным воздухом.
2. С помощью устройства, состоящего из тонкого луча света, пронизывающего зазор между полками, и фотоэлемента с усилителем и микровольтметром.
3. С помощью трех безинерционных термомпар измерялись температуры уходящего холодного воздуха после каждого открывания двери до полного удаления (утечки) этого холодного воздуха.

В результате проведения исследований на модели шкафа-витрины при частотах открывания-закрывания двери равным $6,0$; $10,00$; $13,00$; $15,00$ и $18,00\text{ ч}^{-1}$ было получено количество открываний и

закрываний дверей до полного удаления холодного воздуха и замены его теплым воздухом во всем объеме модели шкафа-витрины.

3. Заключение

1) Проведенные в 2005 году температурные испытания и испытания на оттаивание двух шкафов-витрин в соответствии с ГОСТ 23833-95 на имитаторах рыбы – древесных брусках и спаях хромель-копелевых термопар, заключенных между двумя пакетами, заполненными смесью опилок и слабосоленого раствора, потребовали большой трудоемкости проведенной работы, в то время, как эти шкафы-витрины уже длительно эксплуатировались и были заполнены деликатесной мороженой рыбой.

2) В ГОСТ 23833-95 необходимо было сделать вторую часть, позволяющую в спорных вопросах теплотехнические испытания проводить непосредственно на мороженой продукции, которая находится в шкафах-витринах. Это позволило бы значительно упростить и ускорить эти испытания.

3) Хронометраж открывания и закрывания шкафов-витрин в супермаркете "Норд Вест ФК" в 2007 году показал, что частота открывания этих дверей покупателями колеблется от 6 до 18 ч⁻¹ и весьма редко одновременно открываются две двери. Поэтому в ГОСТ 23833-95 необходимо сделать изменения открывания всех дверей в течение 10 часов, на открывание выборочно 1-2 дверей в течение этих же 10 часов.

4) С увеличением частоты открывания-закрывания дверей покупателями средняя температура внутри шкафов-витрин повышается.

5) Для исследования процессов утечки холодного воздуха через низ открытого проема двери нами была выбрана модель, позволяющая подавать дым в модель шкафа, и утечки холодного воздуха стали видимыми.

6) Испытания модели шкафа-витрины показали, что в период открывания дверей температура воздуха незначительно понижается, а интенсивность его охлаждения становится все меньше при увеличении частоты открывания дверей.

7) Разработаны критериальные уравнения, позволяющие все параметры работы, полученные на модели, пересчитать на натуру, и наоборот – параметры работы натуре можно пересчитать на модель.

8) Проведенные исследования необходимы для составления второй части ГОСТ 23833-95 – проведения температурных испытаний непосредственно на замороженных продуктах, которыми заполнены шкафы-витрины.

Литература

Голубев Б.В., Кобылянский И.Г., Шутов А.В., Долматова Е.В. Экономический эффект от внедрения нового способа температурных испытаний и испытаний на оттаивание шкафов-витрин в магазинах, кулинарных магазинах, ресторанах, кафе и столовых. *Вестник МГТУ*, т.10, № 4, с.577-580, 2007.

Голубев Б.В., Шутов А.В., Кобылянский И.Г., Коваль А.Б. Патент РФ на изобретение 97036. МПК А23В 4/044 (2006.01). Модель дымогенератора для исследования утечек воздуха. Опубл. 7.08.2010, Бюлл. № 24.

Голубев Б.В., Шутов А.В., Кобылянский И.Г., Коваль А.Б., Липин Д.Е. Патент РФ на изобретение 93629. МПК А23В 4/044 (2006.01). Модель дымогенератора для исследования утечек воздуха. Опубл. 10.05.2010, Бюлл. № 13.

ГОСТ 23833-95. Оборудование холодильное торговое (Общие технические условия). *Издание официальное, межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Минск, 1995.*