

**Анатолий Михайлович ПРОТАСЕВИЧ,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
"Теплогоснабжение и вентиляция"  
Белорусского национального  
технического университета

**Светлана Васильевна СОМОВА,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
"Теплогоснабжение и вентиляция"  
Белорусского национального  
технического университета

**Антон Борисович КРУТИЛИН,**  
заведующий сектором  
теплофизических исследований  
РУП "Институт БелНИИС"

**Владимир Владимирович ЛЕШКЕВИЧ,**  
младший научный сотрудник  
Белорусского национального  
технического университета

## ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА И ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЕ СОСТОЯНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

### THERMAL PROTECTION AND HEAT-MOISTURE CONDITIONS OF THE ENCLOSURE STRUCTURES OF INDUSTRIAL REFRIGERATORS

На основании результатов натурных экспериментальных и аналитических теоретических исследований выполнен анализ тепловлажностного режима наружных стен эксплуатируемого холодильника. Результаты исследований положены в основу расчетов систем дополнительной теплоизоляции стен холодильника.

The analysis of the heat-moisture conditions of the exterior walls of the working refrigerator was carried out on the basis of the results of full-scale experimental and theoretical studies. The analysis results formed the basis for the design of the additional heat insulation systems of the refrigerator walls.

#### ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы эксплуатируемых промышленных холодильников во многом зависит от состояния теплоизоляции ограждающих конструкций. Теплозащитные качества ограждений определяются их влажностным состоянием и в первую очередь влажностью используемых теплоизоляционных материалов. Оптимальной считается эксплуатация материалов в зоне сорбционного увлажнения.

Эксплуатация холодильников в процессе годовых климатических изменений способствует формированию особого тепловлажностного режима ограждений. Периодические воздействия климата на здания сопровождаются:

— температурными расширениями и напряжениями в отдельных элементах конструкций, вызывая образование трещин, через которые проникает атмосферная влага;

— диффузией влаги и водяного пара через ограждение;

— увлажнением теплоизоляции и образованием льда и инея.

Увлажнение теплоизоляции стен происходит и со стороны камер хранения вследствие тепло- и влагопоступлений от продуктов при их холодильной обработке.

Многочисленные внешние и "внутренние" воздействия приводят к снижению теплозащитных качеств ограждений, увеличению теплопритоков в здание, нарушению режима работы холодильного оборудования, увеличению расхода электроэнергии. Повышение эффективности эксплуатации холодильников осуществимо путем уменьшения поступления теплоты и влаги при обработке продуктов и снижения теплопоступлений через наружные ограждения.

Уменьшение внутренних тепло- и влагопоступлений при холодильной обработке продуктов связано с корректировкой технологического режима эксплуатации холодильников. Для снижения внешних теплопоступлений необходимо повышение сопротивления теплопере-

даче ограждающих конструкций, то есть выполнение их дополнительной теплоизоляции.

Традиционно теплоизоляция холодильников, исходя из условий формирования их удовлетворительного тепловлажностного режима, должна выполняться со стороны ограждений, контактирующих с более холодной средой, то есть со стороны холодильных камер. Для эксплуатируемых промышленных холодильников это означает остановку их работы на период выполнения дополнительной теплоизоляции.

При капитальном ремонте с заменой основного оборудования вывод холодильника из эксплуатации может быть технически и экономически оправданным. В случае, когда необходимо только повышение теплоизоляции здания для перевода холодильных камер на пониженный температурный режим, нанесение дополнительной теплоизоляции целесообразно выполнять на наружной поверхности ограждения, не выводя холодильник из эксплуатации.

#### ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЕ СОСТОЯНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

Особенности повышения теплозащиты здания при выполнении наружной дополнительной теплоизоляции изучались на примере промышленного холодильника объемом  $V = 53\,000\text{ м}^3$ . Объект исследования — пятиэтажное здание с железобетонным каркасом и самонесущими кирпичными стенами из полнотелого глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе. Со стороны холодильных камер наружные стены теплоизолированы пенополистирольными плитами и оштукатурены известково-песчаным раствором по металлической сетке. Со стороны улицы по кирпичной кладке нанесена штукатурка из полимерцементного раствора. Между кирпичной кладкой и теплоизоляцией размещен пароизоляционный слой из рубероида на битумной мастике. Внутренние стены, отделяющие холодильные камеры

от вестибюля, — из полнотелого глиняного кирпича, с двух сторон теплоизолированы плитами пенополистирола и покрыты штукатурными слоями из известково-песчаного раствора. Между полистирольными плитами (со стороны холодильных камер) и по кирпичной кладке устроена пароизоляция слоями рубероида на битумной мастике. Чердачное перекрытие здания — монолитное, железобетонное с укладкой по нему паро- и теплоизоляции и устройством армированной стяжки цементно-песчаным раствором.

Цель исследований — определение вида дополнительной наружной теплоизоляции ограждающих конструкций для перевода холодильника из режима эксплуатации при температуре минус 20 °С на режим при температуре минус 25 °С.

Выбору вида теплоизоляции предшествовали натурные исследования влажностного состояния и определение теплотехнических характеристик существующих ограждающих конструкций. Указанные исследования были проведены со вскрытием наружных стен холодильных камер. Вскрытию стен предшествовали исследования поверхностных температурных полей ограждения в ИК-лучах. Анализ термограмм, снятых со стороны улицы, показал, что температурные поля стен однородны, за исключением отдельных участков северо-западного направления (рис. 1).

По результатам ИК-съемки выбраны места вскрытия стен здания. Наружные стены вскрывались как со стороны улицы, так и со стороны холодильных камер на одних и тех же участках по этажам здания. На рис. 2 представлены результаты исследований массовой влажности материалов, определенные по наружному сечению стены северо-западного направления. Максимальная влажность зафиксирована в слое полистирола, имеющего плотность  $\rho = 25 \text{ кг/м}^3$ . Абсолютная величина ее значительно превышает расчетное массовое отношение влаги для условий эксплуатации "Б", равное  $W_b = 10 \%$  [1].

При вскрытии со стороны холодильной камеры между слоями штукатурки и пенополистирола, плитами пе-

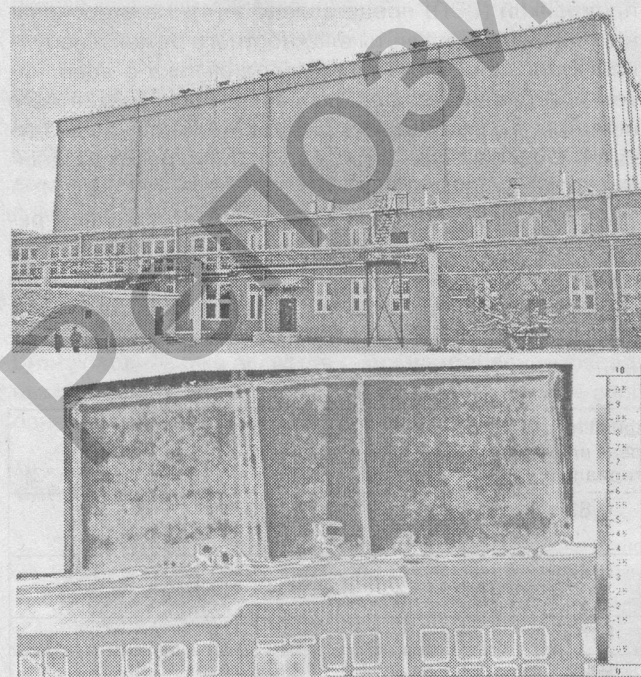


Рис. 1. Фотография и составная термограмма наружных стен, ориентированных на северо-западное направление

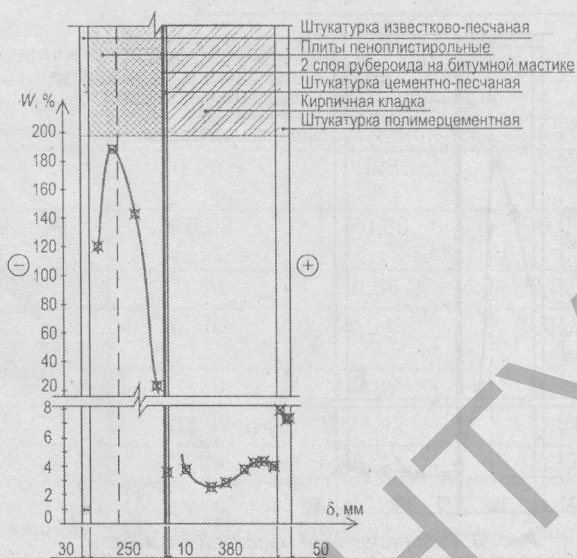


Рис. 2. Распределение массовой влажности по толще наружных стен, ориентированных на северо-западное направление

нополистирола и пароизоляции были выявлены слои льда и инея. Максимальная величина массовой влажности приходилась на плоскость контакта плит из пенополистирола, составляющих слой теплоизоляции. Массовые влажности образцов определялись без учета слоя льда толщиной  $\delta = 2-5 \text{ мм}$ , находившегося между плитами. В контактном слое теплоизоляции у кирпичной кладки массовая влажность утеплителя была минимальна по величине и равна  $W = 23,5 \%$ . Максимальная массовая влажность кирпича достигала  $W = 4,3 \%$  и определялась на расстоянии 40–110 мм от наружной поверхности стены. Штукатурка, уложенная по кладке, имела массовую влажность в пределах  $W = 7,3 \%-7,9 \%$ .

Распределение массовой влажности материалов по сечению юго-восточной стены имело как сходства, так и различия с распределением по сечению стены северо-западной ориентации (рис. 3). В слое теплоизоляции массовые влажности пенополистирола достигали  $W = 190 \%$ . При этом максимальная величина массовой влажности, так же как в стене северо-западного направления, определялась в плоскости контакта плит пенополистирола. Различие наблюдалось в величинах влажности слоев утеплителя, примыкающих к кирпичной кладке. В указанной плоскости массовая влажность пенополистирола равнялась  $W = 2,1 \%$ , что соответствует массовой влажности по условиям эксплуатации ограждений "А". Низкая массовая влажность пенополистирола связана с низкой массовой влажностью кирпичной кладки стены, не превышающей 1%. Максимальная влажность пенополистирола  $W_w = 190 \%$  ( $\rho = 25 \text{ кг/м}^3$ ) соответствует объемной влажности  $W_v = 4,7 \%$ . Указанная величина достаточно велика, но, несмотря на это, видимого нарушения структуры пенополистирола при кристаллизации воды в лед при натурных исследованиях не было выявлено.

Расчеты влажностного режима наружных стен холодильника подтвердили, что зона конденсации водяного пара расположена в слое пенополистирола. Основной причиной высокой массовой влажности материалов стены является недостаточное сопротивление паропроницанию слоя пароизоляции. Улучшение влажностного режима всей стены может быть достигнуто снижением массовой влажности теплоизоляции и устранением в толще зоны конденсации водяного пара. Массовые

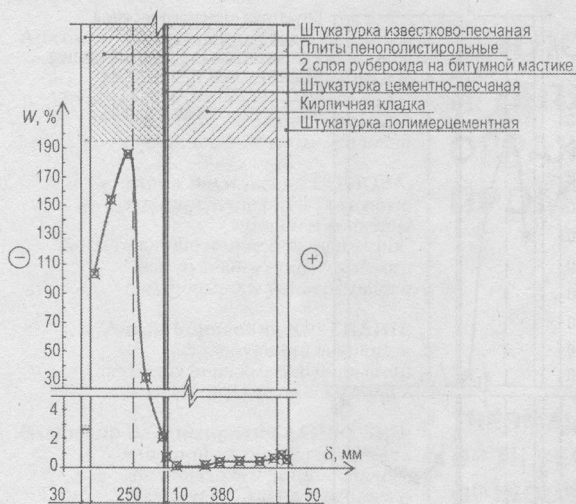


Рис. 3. Распределение массовой влажности по толще наружных стен, ориентированных на юго-восточное направление

влажности материалов чердачного перекрытия не превышали расчетные массовые влажности для условий эксплуатации "Б" [1].

Теплофизические характеристики образцов материалов, изъятых из наружных стен, представлены в таблице 1.

Коэффициенты теплопроводности материалов определены в зависимости от влагосодержания при отрицательных температурах по методике, предложенной А. Г. Перехоженцевым [2].

Сопротивление теплопередаче наружных стен, ориентированных на юго-восток, равно  $3,55 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , для стен северо-западного направления —  $3,29 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , чердачного перекрытия —  $5,22 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

Анализ теплового баланса для исследуемого холодильника показал, что снижение теплопоступлений через стены требует увеличения их сопротивления теплопередаче до нормативной величины  $R_T = 4,7 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  [3]. Расчетная температура внутри холодильных камер  $t_x = (-25) \text{ °C}$ . С учетом сопротивления теплопередаче наружной стены северо-западного направления термическое сопротивление дополнительной изоляции составляет  $\Delta R_T = 1,41 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , а для стен юго-восточной и юго-западной ориентации —  $1,15 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

### ВЫБОР СИСТЕМЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

При выборе системы дополнительной теплоизоляции и материала утеплителя учитывались следующие особенности наружных стен холодильника.

Таблица 1

Наименование материала	Плотность материала $\rho$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Средняя по слою массовая влажность материала $W$ , %	Расчетный коэффициент теплопроводности материала с учетом массовой влажности $\lambda$ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$
Наружная полимерцементная штукатурка	1700	0,82	0,70
Кирпичная кладка на цементно-песчаном растворе	1800	0,42	0,70
Цементно-песчаный раствор	1800	0,72	0,76
Пенополистирольные плиты	25	96,0	0,091
Внутренняя известково-песчаная штукатурка	1700	2,65	0,81

— наличие влаги в виде инея и льда в порах материалов стен;

— возможность конденсации водяного пара из наружного воздуха на охлажденных наружных поверхностях стен в летний период года;

— нагрев наружной поверхности стен за счет солнечного облучения в летний период года;

— наличие потока влаги из наружного воздуха в толщу наружных стен.

Анализ указанных особенностей эксплуатации стен показывает, что выполнение дополнительной теплоизоляции должно обеспечить повышение их сопротивления теплопередаче, инициировать процесс удаления влаги из утеплителя, организовать пароизоляционный барьер на наружной поверхности ограждения.

Положительным решением может быть и консервация наружных стен в существующем тепловлажностном состоянии. Для выполнения указанных задач были рассмотрены три варианта дополнительной теплоизоляции наружных стен:

1) утепление наружных стен по системе "вентилируемый фасад";

2) утепление наружных стен тяжелой штукатурной системой;

3) утепление наружных стен фасадными трехслойными сэндвич-панелями.

В качестве первой системы утепления была принята дополнительная наружная теплоизоляция из блоков пеностекла ( $\delta = 200 \text{ мм}$ ,  $\rho = 160 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), с установкой на отnose утепленной фасадной трехслойной панели. Толщина слоя пенополиуретана в трехслойной фасадной панели принята  $\delta = 30 \text{ мм}$ . Толщина воздушной вентилируемой прослойки — не более 40 мм. Сопротивление теплопередаче наружной стены с учетом слоев теплоизоляции, штукатурки и фактической массовой влажности материалов составило  $R_T = 4,7 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

Решение задачи нестационарного переноса теплоты и влаги при граничных условиях III рода для ограждающих конструкций с вентилируемой воздушной прослойкой (ВВП) представлено в [4]. На ее основании выполнены расчеты влажностного режима наружной стены промышленного холодильника с дополнительной теплоизоляцией по месяцам для трехлетнего периода эксплуатации. Наружная температура воздуха по месяцам принималась по климатическим данным, приведенным в [5].

В качестве примера в таблице 2 представлены результаты расчетов массовой влажности материалов слоев ограждения на июль месяц каждого расчетного года эксплуатации после выполнения теплоизоляции. Результаты показывают, что кирпичная кладка выходит

Таблица 2. Массовая влажность материалов слоев ограждения на июль расчетного года

Наименование слоев ограждающей конструкции, начиная от наружной поверхности	Начальная массовая влажность материала, %	Массовая влажность материала, %		
		1-й год	2-й год	3-й год
1. Наружная полимерцементная штукатурка	1,28	1,28	1,28	1,28
2. Кладка из блоков пеностекла на цементно-песчаном растворе	≈ 0,09	≈ 0,09	≈ 0,09	≈ 0,09
3. Полимерцементная штукатурка	0,82	0,89	0,88	0,88
4. Кирпичная кладка на цементно-песчаном растворе	0,42	0,157	0,049	0,046
5. Цементно-песчаная штукатурка	0,72	0,89	0,89	0,89
6. Пенополистирольные плиты	96,0	83,45	78,12	73,34
7. Известково-песчаная штукатурка	2,65	3,20	3,20	3,20

на квазистационарный влажностный режим примерно через 2 года после устройства изоляции, значительно снижая показатель массовой влажности до уровня сорбционного увлажнения.

Снижение массовой влажности пенополистирола происходило неравномерно: в первый год эксплуатации — более интенсивно, чем в последующие. Ориентировочный период снижения влажности до условий эксплуатации "Б"  $W = 10\%$  по массе — более 15 лет. Таким образом, выполнение дополнительной теплоизоляции по системе "вентилируемый фасад" с использованием в качестве утеплителя блоков из пеностекла  $\delta = 200$  мм позволяет увеличить сопротивление теплопередаче стены до  $R_T = 4,7 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  и прогнозировать снижение массовой влажности материалов, накопленной в предшествующие годы эксплуатации холодильника.

Во втором варианте дополнительной системы утепления стен холодильника принималась теплоизоляция из блоков пеностекла ( $\delta = 200$  мм,  $\rho = 160 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) с укрытием наружной поверхности полимерно-цементной штукатуркой, армированной металлической сеткой (тяжелая штукатурная система). В рассмотренном варианте утепления кирпичная кладка выходила на квазистационарный влажностный режим в течение первых 2 лет после окончания ремонтных работ со снижением массовой влажности до уровня сорбционного увлажнения. Снижение массовой влажности пенополистирола в течение первых 3 лет составило порядка 20 %. Расчетное снижение массовой влажности с каждым последующим годом эксплуатации идет менее интенсивно. Сопротивление теплопередаче дополнительно теплоизолированной стены холодильника в начальный период эксплуатации равно  $R_T = 4,87 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  и с течением времени будет увеличиваться.

Третьим вариантом дополнительной теплоизоляции стен холодильника является система утепления фасадными трехслойными сэндвич-панелями. Наружный слой панели выполняли из металлического листа из оцинко-

ванной стали, покрытого антикоррозионным защитным слоем. Внутренний слой панели — из твердого пенополиуретана толщиной  $\delta = 100$  мм,  $\rho \geq 40 \text{ кг}/\text{м}^3$ , коэффициент теплопроводности — не более  $\lambda = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ . При монтаже панели соединяли друг с другом водонепроницаемым замками. Сэндвич-панели должны устанавливаться вплотную к наружной поверхности стен и составлять с ними одно целое без воздушных прослоек. Сопротивление теплопередаче наружных стен холодильных камер, ориентированных на северо-западное направление, в начальный период эксплуатации равно  $R_T = 4,85 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

Конструкция сэндвич-панелей, имеющих наружный слой из металла, должна обеспечивать надежную влаго- и пароизоляцию со стороны наружной поверхности, а следовательно, и существующий тепловлажностный режим стен холодильника.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повышение теплозащиты зданий холодильников для перевода холодильных камер на пониженный температурный режим может быть достигнуто устройством дополнительной теплоизоляции на наружной поверхности стен, не останавливая при этом эксплуатацию холодильников.
2. На основании результатов натурных экспериментальных и теоретических исследований выполнен анализ тепловлажностного режима наружных стен эксплуатируемого холодильника. Результаты исследований положены в основу расчетов систем дополнительной теплоизоляции стен холодильника.
3. Рассмотренные в статье системы дополнительной теплоизоляции рекомендованы проектным организациям для проектирования их устройства на поверхности стен промышленных холодильников со стороны наружного воздуха.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительная теплотехника: ТКП 45-2.04-43-2006. — Минск, 2007.
2. Перехоженцев, А. Г. Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий / А. Г. Перехоженцев. — Волгоград, 1977. — 271 с.
3. Здания холодильников: ТКП 45-3.02-151-2009. — Минск, 2009.
4. Протасевич, А. М. Расчет тепловлажностного режима наружных стен зданий с вентилируемой воздушной прослойкой и защитными экранами / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. — 2009. — № 1. — С. 19–24.
5. Строительная климатология: СНБ 2.04.02-2000. — Минск, 2001.