

УДК 697.1:536

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НАРУЖНЫХ СТЕН

В.А. Зафатаев, К.И. Урбан

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Республика Беларусь
e-mail: v.zafataev@psu.by, k.i.urban@students.psu.by

Проанализирован нормативный метод теплотехнического расчёта наружных ограждающих конструкций, предполагающий учёт тепловых потерь через теплотехнические неоднородности. Показано, что действующий метод расчёта включает необходимость определения коэффициента теплотехнической однородности ограждающей конструкции, закономерность изменения которого вступает в противоречие с увеличением термического сопротивления теплопередаче по однородной глади ограждающей конструкции. Также отмечается отсутствие в действующих ТНПА условий для нормирования величины этого коэффициента.

Ключевые слова: наружные стены, приведённое сопротивление теплопередаче, коэффициент теплотехнической однородности, сопротивление теплопередаче однородной глади.

ON THE QUESTION OF DETERMINING THE THERMAL HOMOGENEOUSITY COEFFICIENT OF EXTERNAL WALLS MULTILAYER STRUCTURES

V. Zafataev, K. Urban

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Republic of Belarus
e-mail: v.zafataev@psu.by, k.i.urban@students.psu.by

The standard method of thermal engineering calculation of external enclosing structures is analyzed, which involves taking into account heat losses through thermal inhomogeneities. It is shown that the current calculation method includes the need to determine the coefficient of thermal uniformity of the enclosing structure, the pattern of change of which conflicts with the increasing in thermal resistance to heat transfer along the homogeneous surface of the enclosing structure. It is also noted that there are no conditions in the current TNLA for rationing the value of this coefficient.

Keywords: external walls, produced resistance to heat transfer, coefficient of thermal uniformity, resistance to heat transfer of a homogeneous surface.

В связи с тем, что наружная оболочка здания состоит из участков с различными сопротивлениями теплопередаче, теплотехнический расчёт ограждающей конструкции сводится к определению такой величины сопротивления теплопередаче, при которой тепловые потери фрагмента ограждения, отдельного этажа или всего здания будут соответствовать реальным теплотерям. Эта величина получила наименование приведенного сопротивления теплопередаче – $R_{пр}$. Приведенное сопротивление теплопередаче – величина, равная сопротивлению теплопередаче такого однородного участка ограждения, тепловой поток через который равна тепловому потоку через рассматриваемое сложное ограждение. Эта величина нормируется согласно п.7 СН 2.04.02-2020 для зданий различного назначения и для различных стадий их жизненного цикла.

Приведенное сопротивление теплопередаче непрозрачной теплотехнически неоднородной ограждающей конструкции согласно СП 2.04.01-2020 рассчитывают одним из трех методов:

1) упрощенным;

2) с применением справочных значений удельных потерь теплоты через ТН из "каталога удельных потерь теплоты (тепловых мостиков) теплотехнически неоднородных узлов ограждающих конструкций жилых и общественных зданий", разработанного Республиканским унитарным предприятием "Институт жилища НИПТИС им. Атаева С.С." (далее – "каталог");

3) детальным.

Упрощенный метод расчета допускается использовать для предварительных технико-экономических расчетов на стадии разработки предпроектной предынвестиционной документации. Детальный метод применяют при проектировании зданий с использованием конструкций, отличных от указанных в "каталоге" и зданий классов повышенной энергетической эффективности типа А+, что должно быть отражено в задании на проектирование. Таким образом, ниже в статье анализируется второй метод как наиболее часто используемый.

Согласно п. 5.7.1 "каталога" порядок расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций включает следующие этапы:

- анализ конструктивного решения ограждения, определение площади для контрольного значения приведенного сопротивления теплопередаче согласно заданию на проектирование;
- предварительное назначение материала и толщины теплоизоляционного слоя;
- определение по таблицам каталога значений удельных потерь теплоты через ТН конструкции;
- расчёт геометрических параметров удельных потерь теплоты через ТН;
- расчёт приведенного сопротивления теплопередаче, сравнение с нормативным значением. В случае его недостижения увеличение толщины теплоизоляционного слоя, повтор расчета до достижения значений норм.

Отметим, что в формулировках пунктов приведённого выше порядка расчёта в оригинале содержатся синтаксические ошибки, а пункты 3 и 4 следовало бы поменять местами. Таким образом, порядок расчёта, на наш взгляд, должен быть сформулирован следующим образом:

- 1) анализ конструктивного решения ограждающей конструкции, определение площадей по однородной глади контрольных фрагментов наружной стены здания;
- 2) предварительное назначение материала тепловой изоляции и расчёт его толщины;
- 3) расчет геометрических параметров ТН;
- 4) определение по таблицам "каталога" значений удельных потерь теплоты через ТН;
- 5) расчет приведенного сопротивления теплопередаче, сравнение его с нормативным значением. В случае его недостижения – выбор иных комбинаций материалов в ТН для достижения нормативных значений.

Согласно СП 2.04.01-2020 приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции R_{np} , м²·°С/Вт, рассчитывается по формуле:

$$R_{np} = \frac{1}{\sum \frac{a_i}{R_{0i}} + \sum l_j \psi_j + \sum n_k \chi_k + \sum n_m \chi_m}, \quad (1)$$

где a_i – удельная площадь плоского участка конструкции i -го вида, приходящаяся на 1 м² ограждающей конструкции, м²/м²:

R_{oi} – сопротивление теплопередаче теплотехнически однородной части конструкции i -го вида, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

l_j – удельная протяженность линейной теплотехнической неоднородности (далее – ТН) j -го вида, приходящаяся на 1 м^2 ограждающей конструкции, $\text{м}/\text{м}^2$;

ψ_j – удельные потери теплоты (коэффициент теплопередачи) линейной ТН j -го вида, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$;

n_k – количество объемных ТН k -го вида, приходящихся на 1 м^2 ограждающей конструкции, $\text{шт.}/\text{м}^2$;

χ_k – удельные потери теплоты через объемные ТН k -го вида, $\text{Вт}/\text{°C}$;

n_m – количество точечных ТН m -го вида, приходящихся на 1 м^2 ограждающей конструкции, $\text{шт.}/\text{м}^2$;

χ_m – удельные потери теплоты (коэффициент теплопередачи) через точечные ТН m -го вида, $\text{Вт}/\text{°C}$;

$$a_i = \frac{A_i}{\sum A_i}, \quad (2)$$

здесь A_i – площадь плоского участка конструкции i -го вида, м^2 , с сопротивлением теплопередаче R_{oi} , %.

Согласно СП 2.04.01-2020 теплотехнической неоднородностью (ТН) называют область ограждающей конструкции, характеризующуюся содержанием элементов с различными коэффициентами теплопроводности материалов и/или с переменной толщиной сечения, расположенных параллельно направлению теплового потока, и/или имеющих углы, примыкания смежных конструкций, проёмы, приводящие к искажению изолиний температуры по толщине конструкции. Линейной ТН называют протяженную теплотехническую неоднородность, длина которой не менее, чем в 3 раза превышает ее размеры одновременно по двум другим направлениям. Точечной ТН называют локальные теплопроводные включения. Объемной ТН называют примыкание нескольких локальных элементов ограждающей конструкции.

$$l_j = \frac{L_j}{\sum A_i}, \quad (3)$$

здесь L_j – протяженность линейной ТН j -го вида, м;

$$n_k = \frac{N_k}{\sum A_i}, \quad (4)$$

здесь N_k – количество объемных ТН k -го вида;

$$n_m = \frac{N_m}{\sum A_i}, \quad (5)$$

здесь N_m – количество точечных ТН m -го вида;

$$R_{0i} = \frac{1}{\alpha_v} + R_k + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (6)$$

здесь α_v – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С); α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С);

$$R_k = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (7)$$

здесь R_1, R_2, \dots, R_n – термические сопротивления отдельных слоев ограждающей конструкции, м²·°С/Вт;

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (8)$$

здесь δ_i – толщина i -го слоя ограждающей конструкции, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя ограждающей конструкции в расчётных условиях эксплуатации, Вт/(м·°С);

Согласно Р 1.04.180-2019 коэффициент теплотехнической однородности r является коэффициентом пропорциональности между сопротивлением теплопередаче теплотехнически однородных фрагментов ограждающей конструкции и сопротивлением сложного ограждения с теплотехническими неоднородностями. Коэффициент теплотехнической однородности r рассчитывается по формуле:

$$r = \frac{R_{np}}{R_{np0i}}, \quad (9)$$

где R_{np} – приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м²·°С/Вт;
 R_{np0i} – приведенное сопротивление теплопередаче плоского участка конструкции i -го вида:

$$R_{np0i} = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{R_{0i}}}. \quad (10)$$

Результаты расчёта r , выполненного в БНТУ [1], для стен различных конструкций указывают на снижение теплотехнической однородности конструкций с увеличением толщины слоя тепловой изоляции, т.е. с увеличением сопротивления теплопередаче R_{0i} по однородной глади.

Для расчёта приведённого сопротивления теплопередаче наружных стен с лёгкими штукатурными системами согласно п. 7.3.6 СП 3.02.01-2020 предлагается использовать расчётные значения r из таблицы 5 этого СП. Однако при использовании этих значений в расчётной величине приведённого сопротивления теплопередаче будет учтён только вид крепёжных элементов для утепляющего слоя и шаг сетки их установки (точечные ТН) безотносительно наличия в стенах иных теплотехнически неоднородных элементов линейного и объёмного типа. Также в действующих ТНПА отсутствует какое-либо нормирование величины r . Единственное упоминание о возможных значениях r для наружных ограждающих конструкций содержится в п. 3.4 Р 1.04.180-2019, и только в качестве ориентировочных для предварительного расчёта толщины теплоизоляционного слоя.

При увеличении толщины утеплителя, несмотря на очевидное увеличение сопротивления теплопередаче по однородной глади R_{0i} конструкции, неизбежно возрастают длины линейных ТН L_j , что при прочих равных условиях снижает величину приведённого сопротивления теплопередаче $R_{пр}$ (см. формулу (1)). Существенное влияние на снижение r оказывает воздействие оконных откосов, углов и узлов сопряжения.

С увеличением толщины утеплителя удельные потери теплоты через многие ТН возрастают. Такими ТН в "каталоге" являются: линейные ТН примыкания наружных стен из керамического полнотелого кирпича и силикатного полнотелого кирпича к чердачному перекрытию/совмещенному покрытию (таблица 6.1.3.1); линейные ТН примыкания наружных стен из ячеистобетонных стеновых блоков, керамического полнотелого кирпича и силикатного полнотелого кирпича к цокольному перекрытию (таблица 6.1.4.1, 6.1.4.2); линейные ТН бокового и нижнего примыкания оконного блока (ширина рамы 70 мм) без наружного откоса для стен из ячеистобетонных стеновых блоков, железобетона, керамического полнотелого кирпича и силикатного полнотелого кирпича (таблица 6.1.5.1 "каталога"); линейные ТН верхнего примыкания оконного блока к железобетонной перемычке без наружного откоса (таблица 6.1.5.6); линейные ТН выпуклого угла, образованного самонесущей и несущей стенами из ячеистобетонных стеновых блоков, керамического полнотелого кирпича и силикатного полнотелого кирпича (таблица 6.1.6.1); точечные ТН для анкерных устройств с металлическим сердечником диаметром 5,5 мм без термозаглушки для стен из бетонных стеновых блоков (таблица 6.2.2.1); объемные ТН для углового (выпуклый угол) примыкания двухслойных наружных стен из керамического полнотелого кирпича и силикатного полнотелого кирпича к балконной плите перекрытия (таблица 6.3.2.1) и др.

Также при повышении R_{0i} стены в результате усиливающегося теплового потока через теплопроводные включения, обусловленного применением более эффективного теплоизоляционного материала, коэффициент теплотехнической однородности r также снижается [2], [3]. Причём с ростом R_{0i} снижение r происходит гиперболически, и тем сильнее, чем выше теплоизолирующие свойства утеплителя (рисунок 1).

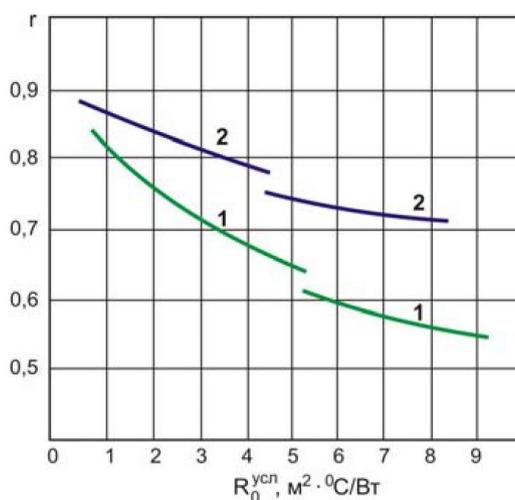


Рисунок 1. – Зависимость коэффициента теплотехнической однородности r в трёхслойной железобетонной панели от условного сопротивления теплопередаче $R_{0}^{усл}$

1 – с пенополистирольными плитами $\lambda = 0,04 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$;

2 – с минераловатными плитами $\lambda = 0,08 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$

(* условным авторы [2], [3] называют сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции по однородной глади)

Из рисунка 1 видно, что увеличение сопротивления теплопередаче $R_0^{всл}$ от санитарно-гигиенического уровня 1,2–1,5 м²·°С/Вт (согласно исследованиям Российского общества инженеров строительства (РОИС) [4]) до уровня энергосбережений 3,2–4,2 м²·°С/Вт снижает коэффициент теплотехнической однородности на 10–15%. Причем интенсивность изменения $R_0^{всл}$ зависит от вида утеплителя (кривые 1 и 2). Только при достаточно большой толщине слоя утеплителя с высокой воздухопроницаемостью (например, минераловатные плиты), обеспечивающей $R_0^{всл}$ не ниже 5 м²·°С/Вт снижение величины r замедляется.

Вместе с тем, экономия тепловой энергии на нужды отопления здания не находится в прямо пропорциональной зависимости от увеличения приведённого термического сопротивления теплопередаче его наружных стен [5] (рисунок 2).

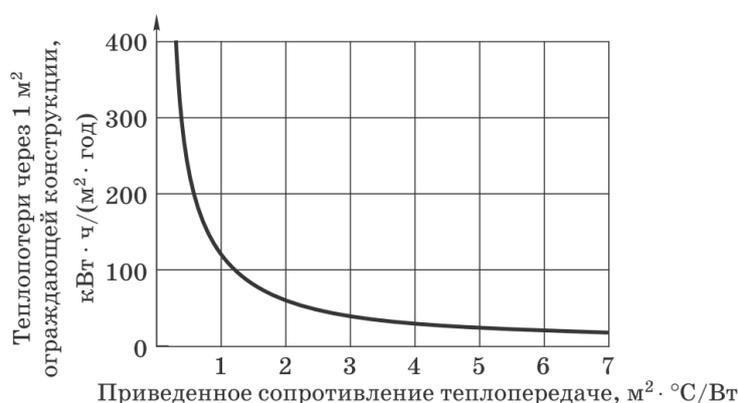


Рисунок 2. – Зависимость теплотерь через 1 м² ограждающей конструкции от приведенного сопротивления теплопередаче

Из рисунка 2 видно, что увеличение приведенного сопротивления теплопередаче больше 1,5–2,0 м²·°С/Вт приводит к незначительной экономии энергоресурсов на компенсацию тепловых потерь. Т.е. чем выше достигнутый уровень теплозащиты здания, тем меньший экономический эффект даёт его дальнейшее повышение [5].

Кроме того, увеличение толщины утеплителя вступает в противоречие с долговечностью стен. С увеличением толщины теплоизоляционного слоя более 200 мм возникает необходимость (в целях сохранения прочности панели) установки дополнительных металлических связей или увеличения их диаметра при том же количестве. При этом при увеличенной толщине утеплителя в стенах существенно возрастают усадочные и температурно-влажностные деформации, что приводит к образованию трещин, разрывам контактных зон с конструкционными материалами [3]. Вместе с тем повышается объём влаги в стене и узлах сопряжений. Стены и узлы сопряжений, имеющие ориентацию на север, насыщенные металлом, могут не успеть войти в квазистационарное влажностное состояние в годовом цикле эксплуатации ввиду отсутствия прямого солнечного облучения. Систематическое накопление влаги приводит к ускоренному морозному разрушению, снижению срока службы наружных стен [3].

Результаты теплотехнических исследований эксплуатируемых зданий с современными теплоизоляционными материалами, проведенных РОИС в 2013-2014 гг. [6], [7] показали, что минераловатные плиты, обладающие высокой воздухопроницаемостью, снижают теплозащитные свойства наружных стен на 30–40 %. Практически $R_{пр}$ наружных стен зданий с современными теплоизоляционными материалами в г. Москва оказались не выше 2,19 м²·°С/Вт, а с учетом воздухопроницаемости снижаются до 1,5 м²·°С/Вт [6], [7]. Полученные РОИС данные согласуются с результатами комплексных инструментальных обследований более ста эксплуатируе-

мых зданий, выполненных в ГБУ «Центр экспертиз, исследований и испытаний в строительстве (ЦЭИИС)», доложенных зав. лабораторией С. И. Крышовым на организованном Министерством строительства и ЖКХ в НИИСФ РААСН семинаре "Проблемы нормирования энергоэффективности и энергосбережения в строительстве" и конференции 1 июля 2016 г. Приведенные в докладе фактические значения теплозащитных свойств наружных стен большинства обследованных зданий находились в пределах от 2,5 до 1,5 м²·°С/Вт [8], что до 52-57% ниже проектного и нормативного значения, требуемого согласно СН 2.04.02-2020, и составляющего 3,2 м²·°С/Вт.

Другой аспект, приводящий к снижению расчётной величины приведённого сопротивления теплопередаче $R_{пр}$ заключается в "неправильном" выборе контрольных фрагментов плоских участков ограждающих конструкций и определении их площади A_i . Согласно п. 5.7.2 "каталога" при отсутствии в задании на проектирование ограничений по площади ограждающей конструкции, значение приведенного сопротивления теплопередаче определяется для всей ограждающей конструкции. Однако если в качестве расчётной A_i принять площадь наружных стен какого-то одного помещения, например, углового помещения верхнего этажа, или небольшой группы помещений, то количество объёмных N_k и точечных N_m ТН, приходящихся на эту площадь, а также удельная длина l_j линейных ТН будет больше, чем в случае, если в качестве расчётной принять суммарную площадь всех наружных стен здания. Очевидно, что в таком случае расчётное значение $R_{пр}$ заведомо получится ниже для наружных стен отдельного помещения (и тем ниже, чем большее количество неоднородных элементов в такой конструкции), и выше в расчёте на площадь наружных стен всего здания. При этом не удивительно, что наружные стены здания согласно такому расчёту будут иметь разный расчётный уровень утепления. Если в качестве расчётной принять площадь по однородной глади всех наружных стен, расчётное значение приведённого сопротивления теплопередаче $R_{пр}$ получается обобщённым по зданию, и более приближённым к значению в центральной части стен здания, в то время как стены угловых помещений и помещений крайних этажей будут иметь приведённое сопротивление меньше обобщённого по зданию, т.е. меньше нормативного, даже если обобщённое его по расчёту достигает. Институт жилища НИПТИС им. Атаева С.С. даже имеет патент на изобретение [9] – утепляющую оболочку здания, которая позволяет обеспечить одинаковый уровень тепловых потерь во всех частях здания. Согласно патенту, в местах наибольших тепловых потерь (т.е. в местах наибольшего сосредоточения теплотехнически неоднородных элементов) слой утеплителя должен иметь бóльшую толщину, чем в средней части здания (таблица 1).

Таблица 1. – Толщина слоя утеплителя δ в наружных стенах для различных помещений здания

Наименование помещения	$R_{пр}$, м ² ·°С/Вт	δ , м
Середина фасада (эталонное помещение)	2	0,04
Торцевое помещение	4,6	0,17
Угловая комната верхнего этажа	6,7	0,28
Угловая комната первого этажа	6,6	0,27
Перекрытие над верхним этажом	12	0,57
Перекрытие над подвалом	10	0,47

Таким образом, доведение величины приведённого сопротивления теплопередаче до действующих норм за счёт увеличения толщины теплоизоляционного слоя вступает в противоречие с долговечностью стен. Проектирование и строительство зданий с конструкциями

наружных стен, уровень утепления которых превышает санитарно-гигиенические показатели, должно выполняться на добровольной основе. Повышать уровень теплоизоляции наружных стен сверх санитарно-гигиенических требований нецелесообразно, так как это не приводит к существенной экономии энергии на нужды отопления зданий, оборудованных системами вентиляции с естественным побуждением [2]. Большая часть таких зданий в стране (до 98%) представлена жилым фондом. Поэтому решать проблему энергосбережения эксплуатируемых зданий более целесообразно за счёт снижения энергозатрат на подогрев вентилируемого воздуха. В энергетическом балансе здания энергозатраты на компенсацию теплопотерь через наружные стены составляют 38,2%, на подогрев вентилируемого воздуха – 38,5% [3]. Увеличение $R_{пр}$ стен до нормативного значения $3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ приводит к перераспределению этих составляющих соответственно до 19 и 50% [3]. Значительно снизить расход энергии на подогрев вентилируемого воздуха возможно за счёт устройства в здании системы механической или комбинированной приточно-вытяжной вентиляции с утилизаторами теплоты удаляемого воздуха и герметичных окон. При этом вполне допустим некоторый перерасход тепловой энергии на отопление зданий и электроэнергии на привод вентиляторов, но эти затраты должны окупиться экономией средств на ремонт наружных стен, уровень утепления которых соответствует санитарно-гигиеническим требованиям, а также более длительным сроком службы здания [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений : учеб. пособие / А. М. Протасевич. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 239 с.
2. Лобов, О. И. Взгляд на энергосбережение сквозь стены / О. И. Лобов, А. И. Ананьев, Ю. Я. Кувшинов, С. А. Бегоулев // Строительный эксперт. – № 5 (168). – 2004.
3. Лобов, О. И. Теплозащитные свойства и долговечность фасадных систем современных зданий / О. И. Лобов, А. И. Ананьев, В. П. Абарыков, А. Е. Синютин // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции «Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий». Санкт-Петербург. – 2009. – С. 80–92.
4. Лобов, О. И. Основные причины несоответствия фактического уровня тепловой защиты наружных стен современных зданий нормативным требованиям / О. И. Лобов, А. И. Ананьев, А. Г. Рымаров // Промышленное и гражданское строительство. – № 11. – 2016. – С. 67–71.
5. Куприянов, В. Н. Проектирование теплозащиты ограждающих конструкций : учеб. пособие / В. Н. Куприянов. – Казань: КГАСУ, 2011. – 161 с.
6. Ананьев, А. И. К вопросу нормирования уровня теплозащиты наружных стен зданий / А. И. Ананьев, О. И. Лобов // Градостроительство. – № 5 (27). – 2013. – С. 66–68.
7. Ананьев, А. И. Керамический кирпич и его место в современном строительстве / А. И. Ананьев, О. И. Лобов // Промышленное и гражданское строительство. – № 10. – 2014. – С. 62–65.
8. Крышов, С. И. Проблема экспертной оценки тепловой защиты зданий / С. И. Крышов, И. С. Курилик // Жилищное строительство. – № 7. – 2016. – С. 3–5.
9. Здание с утепляющей оболочкой : изобр. 10716 / Л. Н. Данилевский, В. М. Пилипенко, В. А. Потерщук. – Опубл. 30.06.2008.