

НАРУЖНЫЕ СТЕНЫ СОВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЙ ИЗ ПОРИЗОВАННОЙ КЕРАМИКИ

В данной статье автор излагает результаты своих 17-летних исследований, теплотехнического проектирования, анализа работы ограждающих конструкций в натурных условиях, теплотехнических расчетов и исследований энергоэффективности более, чем на полутысяче объектов различного назначения — от дошкольных образовательных учреждений до крупных комплексов жилого и общественно-общественного назначения.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА О ПОРИЗОВАННОЙ КЕРАМИКЕ

До появления в 1995 г. новых теплотехнических нормативов в Ленинграде и многих других городах жилые и общественные здания возводились с наружными стенами из кирпича толщиной 510 мм. Они отвечали нормативам комфортности и теплоизоляции того времени. Новая редакция СНиП П-3-79* вынуждала проектировщиков и производителей искать совершенно новые решения, т. к. кирпич, по традиции, еще производился только глиняный обожженный с низкими теплоизолирующими свойствами. Выполнить требования новой редакции СНиП П-3-79* можно было: утолщением наружных стен до 1,5–2,5 м; применением колодцевой кирпичной кладки с заполнением ее теплоизолирующими материалами; с помощью нанесения разными способами теплоизолирующих материалов на поверхности стен. Качественный переворот в промышленности совершился, когда производители начали поставлять керамический кирпич и камень (табл. 1), применение которых в строительстве (до 2000 г.) позволяло обеспечить требуемую нормами теплозащиту помещений и одновременно сохранить оптимальную толщину наружных стен.

Теплотехнические характеристики кладки из лицевого кирпича и камней керамических поризованных были представлены всеми производителями этих изделий на основе испытаний по ГОСТ 530-95 и ГОСТ 26254-84 в климатической камере Испытательного центра СПбЗНИИПИ (ЗАО «Победа-Кнауф», протокол № 1051/2000 от 02.2000 г.), Испытательного центра «ПКТИ-СтройТЕСТ» в Петербурге (НПО «Керамика», протокол № 8 от 20.11.2001), Испытательного центра СПбГАСУ (ЗАО «Петрокерамика, протокол № 290 от 13.11.2001). При исследовании фрагментов кладки в лабораторных условиях испытательных центров теплотехнические измерения проводились без армирования фрагментов кладки. В связи с чем нашими дальнейшими исследованиями и расчетами необходимо было назначить допустимое армирование кладки при сохранении необходимой теплозащиты стен. Результатом совместной работы петербургских производителей керамических изделий и ОАО «ЛЕННИИПРОЕКТ» в 2000–2002 гг. явился выпуск большого цикла «Рекомендаций по проектированию наружных стен толщиной 640 мм из поризованной керамики для жилых и общественных зданий» [В. Ф. Акутин, А. А. Асеев, А. П. Кочнев. Современные стены зданий из керамического кирпича // Научно-технический и производственный журнал «Строительные материалы». М., 2002. № 8].

В табл. 1 представлены сравнительные характеристики применяемых керамических изделий и легкого кладочного раствора фирм-производителей, работающих в Санкт-Петербурге и Ленинградской области.

Табл. 1. Сравнительные характеристики применяемых керамических изделий и легкого кладочного раствора фирм-производителей, работающих в Санкт-Петербурге и Ленинградской области (данные до 2005 г., до образования ОАО «Победа ЛСР»)

Керамические изделия	Фирма-производитель		
	ЗАО «Победа-Кнауф» (Санкт-Петербург)	НПО «Керамика» (Санкт-Петербург)	ЗАО «Петрокерамика» (Ленинградская область)
Кирпич лицевой керамический с размерами 250 x 120 x 65 мм			Используется кирпич лицевой производства или ЗАО «Победа-Кнауф», или НПО «Керамика»
Коэффициент теплопроводности при эксплуатационной влажности, Вт / м ² С	0,31	0,31	
Объемная масса изделия, кг/куб. м	1070	1 150	
Марка (прочность)	175	100, 125, 150	
Камни керамические поризованные пустотелые с размерами 250x120x142 мм			
Коэффициент теплопроводности при эксплуатационной влажности, Вт/м ² С	0,23	0,213	0,23
Объемная масса изделия, кг/куб. м	798	885	931
Марка (прочность)	150	100, 125, 150	100, 125, 150

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ОЦЕНОК. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ

В работах ОАО «ЛЕННИИПРОЕКТ» использованы две расчетные модели, позволяющие выделить значение свойств кладочных растворов в обеспечении необходимых сопротивлений теплопередаче наружных стен в соответствии с нормативами.

В расчетной модели первого типа (рис. 1) точно копируется система кладки, система перевязки швов, а также конструкция армирования. Расчетная модель первого типа является точной копией реальной кладки стен и позволяет количественно оценить энергосберегающую полезность, например, предложения о применении легкого кладочного раствора для возведения стен при полном их соответствии требованиям СНиП или в иных случаях.

В расчетной модели второго типа принято справедливым, с физической точки зрения, чтобы вся кладка, как система керамических камней, лицевых кирпичей и кладочных швов, характеризовалась теми единственными коэффициентами теплопроводности, которые получены при исследовании фрагментов кладки на том или

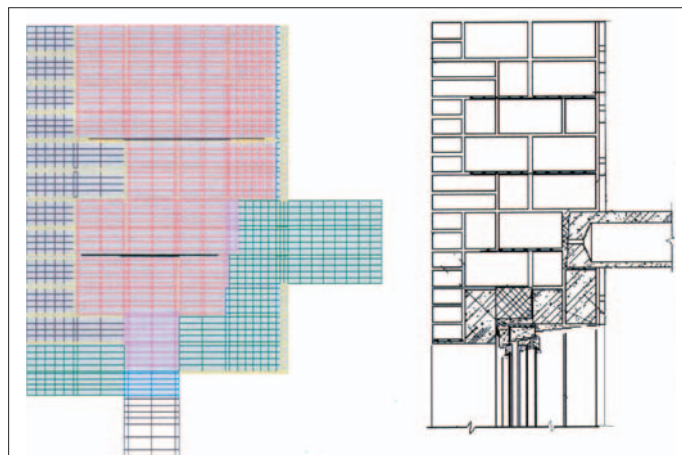


Рис. 1. Расчетная модель кладки стен, позволяющая выделить значение свойств кладочных растворов в обеспечении необходимых сопротивлений теплопередаче наружных стен в соответствии с нормативами

ином растворе в лабораторных условиях. В этом случае есть основание полагать, что расчетная модель будет не только точной геометрической копией, но и достаточно точной физической копией реальной кладки стен, испытанной в лабораторных условиях без учета армирования. Такой подход к моделированию кладки позволил определить необходимый набор рациональных, с технико-технологической точки зрения, конструктивных решений наружных стен.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

При колебаниях температур уравнение для расчетов температурных полей в пространственной конструктивной системе при учете фактора времени выглядит следующим образом:

$$k - \lambda_n \cdot m = 0,$$

где: k — матрица характеристик теплопроводности, m — матрица инерционных характеристик системы.

Первоначально данная математическая модель применена в ОАО «ЛЕННИИПРОЕКТ» для оценки вибрационных и акустических полей конструктивных систем зданий. Результаты применения модели были доложены в 1996 г. Международному конгрессу по звуку и вибрации [Anatoly P. Kochnev. The Region Building Regulations about Noise-Reduction and Vibration Strength. Fourth International Congress of Sound and Vibration. June 24-27. 1996. St. Petersburg. Russia].

Основой модели является теория анализа и синтеза форм колебаний, что позволяет использовать ее и для расчетов температурных полей.

Собственные векторы λ_n и матрица собственных векторов Φ определяются из уравнения:

$$E^{(k)} \cdot V^t = 0, \quad (1)$$

$$\text{где: } E^{(k)} = k \cdot \lambda_n \cdot m = 0.$$

Амплитуды инерционных (тепловых) характеристик в обобщенных координатах

$$Y_k(t=0) = M^{-1} \cdot \Phi^T \cdot m \cdot v(t=0), \quad (2)$$

где: M — обобщенная инерционная характеристика системы;

$$M = \Phi^T \cdot m \cdot \Phi \quad (3)$$

Если вектор инерционных сил или вектор тепловых воздействий P_0 задан, то амплитуды в обобщенных координатах:

$$Y_n(t) = [P_{on}(t)/K_n] \cdot [1/\{1 - (\omega/\lambda_n^{0.5})\}] \cdot [\sin \omega t - (\omega/\lambda_n^{0.5}) \sin \lambda_n^{0.5} t], \quad (4)$$

где: K_n — обобщенная теплопроводность системы;

$$K_n = \Phi^T \cdot k \cdot \Phi; \quad P_{on}(t) = \Phi^T \cdot P_0 \quad (5)$$

Переход к реальным (физическим) координатам (амплитудам, скоростям изменений тепловых характеристик) реализуется с помощью формул:

$$v = \Phi \cdot Y_n(t) \text{ — вектор амплитуд в реальных координатах.} \quad (6)$$

В связи с тем, что элементы матрицы векторов Φ от времени не зависят, то реальные амплитуды и скорости и по формам колебаний вычисляются с помощью формул:

$$v_k(t) = \sum \varphi_{kn} \cdot Y_n(t). \quad (7)$$

Здесь каждое слагаемое в правой части дает необходимые характеристики для определенной формы колебаний (k — номер формы колебаний; φ_k — координаты собственных векторов).

При отсутствии колебаний температур, т. е. для условно стационарных условий расчет ведется упрощенно для первого шага процедуры расчета. Для значительного числа форм колебаний при использовании персональных компьютеров и специальных программ расчет проводится по формулам (3) – (7) на основе конечно-элементной модели. При количестве конечных элементов не более 6–7 расчет можно вести и без применения персональных компьютеров. Как правило, для приемлемой точности расчета количество конечных элементов составляет не менее нескольких десятков тысяч. Поэтому применение персональных компьютеров неизбежно в сложной (реальной) конструктивной системе. Упрощение модели состоит также в отсутствии учета фактора времени. В инженерном виде конечно-элементная модель для плоской расчетной модели без

учета фактора времени, в соответствии со Справочником по численному решению дифференциальных уравнений в частных производных (Гостехиздат, М., 1951 г.), рассматривается как система линейных алгебраических уравнений n -го порядка. Каждое уравнение системы имеет вид:

$$\tau_{xy} = [K_{xy,x+h} \cdot \tau_{x+h,y} + K_{xy,x-h} \cdot \tau_{x-h,y} + K_{xy,x+h} \cdot \tau_{y+h,y} + K_{xy,y-h} \cdot \tau_{y-h,y}] / [K_{xy,x+h} + K_{xy,x-h} + K_{xy,y+h} + K_{xy,y-h}], \quad (8)$$

где: τ — температура на границе соответствующего конечного элемента; K — коэффициент теплопередачи от соответствующего узла « xu » к узлу « $x+h$ » в направлении x или y , h — шаг сетки или размер конечного элемента, « x » и « y » — координаты узлов конечно-элементной модели в направлении осей « X » и « Y » в соответствующей системе координат.

Уравнения по каждому из многих тысяч узлов конечно-элементной модели формируются автоматически по приведенной общей формуле в зависимости от величин K , h , τ и его координат.

ОЦЕНКА ПРИВЕДЕННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ПО ИТОГАМ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

Расчет приведенных сопротивлений теплопередаче проводился по методике СНиП П-3-79*. «Строительная теплотехника» для объектов с началом строительства после 01.01.2000 г. (с учетом санитарно-гигиенических, энергосберегающих и комфортных условий эксплуатации). Ныне такой расчет проводится по аналогичным формулам методики СП 23-101-2003 «Тепловая защита зданий». На этом этапе строительства для стен жилых зданий в условиях Санкт-Петербурга минимальное значение приведенного сопротивления теплопередаче

$$R_0^{Tp} = 2,92 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}. \quad (9)$$

В ограждающих конструкциях с теплопроводными включениями приведенное сопротивление теплопередаче вычисляется по формуле:

$$R_0 = (t_b - t_n) / q^p \quad (10)$$

$$\text{где } q^p = \alpha_b (t_b - \tau_{всп}), \quad (11)$$

где α_b — коэффициент тепловосприятия, расчетная температура наружного воздуха принята для Санкт-Петербурга равной -26 °C , t_b — расчетная температура внутреннего воздуха.

Величина α_b (коэффициент тепловосприятия) принимается по СНиП.

Величина расчетной температуры внутреннего воздуха в жилом помещении принималась в этот период равной 18 °C ; теперь = 20 °C , а величина в обязательном порядке определялась на основе расчетов температурных полей в ограждающих конструкциях. Значение требуемой температуры на внутренней поверхности ограждения вычисляется на основе исходных выражений (9) и (11) по формулам:

$$\tau_b^{mp} = t_b - ((26 + t_b) / (\alpha_b \cdot R_0^{Tp})) \text{ или} \quad (12)$$

$$\tau_b^{mp} = t_b - ((26 + t_b) / (\alpha_b \cdot R_0^{Tp})). \quad (13)$$

ПРИЕМЫ ЭНЕРГО-ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ СТЕН ТОЛЩИНОЙ 640 ММ

Наиболее продуктивными следует назвать такие приемы, как:

- увеличение четверти оконного проема как один из приемов, позволяющих сокращать трансмиссионные потери тепловой энергии через стены;
- теплоизоляции в ряду ж/б перемычек;
- теплоизоляция в стыках балконных плит и перекрытий.

Мы в те годы подвергали строгому учету любую малозначительную на первый взгляд возможность сокращения трансмиссионных потерь, как теперь говорят, тепловой энергии через стены. Боролись за десятки доли процента эксплуатационной влажности. Это было очень важно, т. к. величина эксплуатационной влажности определяла расчетную проектную теплопроводность кладки с корректировкой коэффициента теплопроводности, всегда определяемого в испытательных лабораториях для сухого образца того или иного материала. Благодаря нашей с производителями настой-

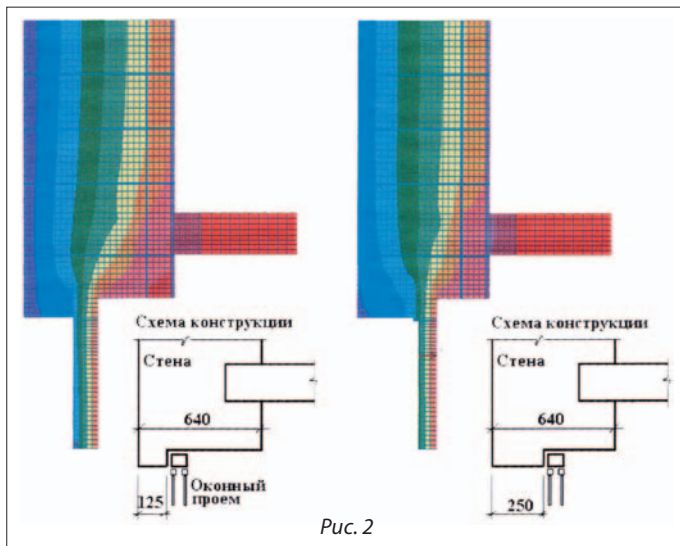


Рис. 2

чивости были организованы специальные исследования эксплуатационной влажности керамических изделий. В итоге мы получили расчетные коэффициенты теплопроводности весьма близкие к реальным — основные прочностные и теплотехнические характеристики керамических поризованных камней и керамического кирпича принимались при эксплуатационной влажности кладки в целом не более 1,4% (эксплуатационная влажность 1,4% принята в соответствии с отчетом о научно-исследовательской работе НИИ-ИСФ № 12250 от 26.09.1997 г.). При этом влажность камней во время испытаний в НИИ-ИСФ не превысила 0,7–0,9%.

УВЕЛИЧЕНИЕ ЧЕТВЕРТИ ОКОННОГО ПРОЕМА КАК ОДИН ИЗ ПРИЕМОВ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ СОКРАЩАТЬ ТРАНСМИССИОННЫЕ ПОТЕРИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЧЕРЕЗ СТЕНЫ

Нами решались задачи существенного сокращения теплопотерь путем: выбора ширины четверти оконного проема, теплоизоляции в рядах ж/б перемычек, теплоизоляции в стыках балконных плит и перекрытий. Если рассматривать стены примерно одной толщины и из изделий с близкими теплотехническими характеристиками, то можно сделать очевидный вывод об относительно стабильном положении изотермы с нулевой температурой в поперечном сечении стены. Теплопотери в оконном проеме происходят не только непосредственно через остекление, но и через откосы оконного проема. Действительно, как показал численный анализ, в стенах толщиной 640 мм при ширине четверти оконного проема, равной 125 мм, средняя температура на внутренней поверхности откоса ниже на 2 °С, чем при ширине четверти 250 мм. Значит, теплопотери через откосы оконных и довольно многочисленных дверных проемов, в том числе и балконных, можно снизить, если оконный или дверной блоки в разумных пределах переместить как можно ближе к внутренней поверхности стены. На рис. 2 представлен результат одного из первых примеров электронных расчетов температурных полей в проектно-строительной практике нашего города. Эти первые расчеты проведены автором в институте ЛЕННИИПРОЕКТ в 1994 г.

В неоднородных ограждающих конструкциях с теплопроводными включениями приведенное сопротивление теплопередаче определено формулой:

$$R_0 = ((26 + t_b)/q_p) \cdot F, \text{ где } q_p = \alpha_b(t_b + \tau_{вср}).$$

Величины α_b и t_b принимались по СНиП, а величины τ_b (температура на внутренней поверхности откосов) в обязательном порядке определялись расчетами температурных полей в ограждающих конструкциях. Для четверти 125 мм $\tau_{вср1} = 13,549$ °С, а для четверти 250 мм $\tau_{вср2} = 15,367$ °С.

Удельная расчетная теплоотдача откосов оконного или дверного проемов:

$$q_{расч1}^{эфф} = \alpha_b(t_b - \tau_{вср1}) = 8,7 \cdot (18 - 13,549) = 38,72 \text{ Вт/кв. м (четверть 250 мм)},$$

$$q_{расч2}^{эфф} = \alpha_b(t_b - \tau_{вср2}) = 8,7 \cdot (18 - 15,367) = 22,9 \text{ Вт/кв. м (четверть 125 мм)}.$$

$$q_{расч1}^{эфф} < q_{расч2}^{эфф}. \text{ Разница составляет } 15,8 \text{ Вт/кв. м.}$$

Площадь откосов при ширине четверти 125 мм $S_1 = 1,6$ кв. м, а при ширине четверти 250 мм $S_2 = 0,8$ кв. м.

$$\text{Суммарная теплоотдача } Q_{расч1}^{эфф} = S_1 \cdot q_{расч1}^{эфф} = 1,6 \cdot 38,72 = 61,95 \text{ Вт},$$

$$Q_{расч2}^{эфф} = S_2 \cdot q_{расч2}^{эфф} = 0,8 \cdot 22,9 = 18,32 \text{ Вт}.$$

$$\text{Тогда } Q_{расч1}^{эфф} - Q_{расч2}^{эфф} = 61,95 \text{ Вт} - 18,32 \text{ Вт} > 43,6 \text{ Вт}.$$

Таким образом, теплоотдача откосов при ширине четверти 125 мм больше на 43,6 Вт для одного окна. Данный факт, вы понимаете, до сих пор должным образом не признан, потому что он не закреплен нормативно, но он существует и известен. Кроме этого, в реальных условиях эксплуатации при ширине четверти 125 мм можно предположить большую, и практика обследований это подтверждает, вероятность совпадения минимальной температуры и температуры точки росы.

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ В РЯДУ Ж/Б ПЕРЕМЫЧЕК

Один из примеров теплотехнических оценок приведен для стен с внешним слоем из кирпича керамического лицевого и внутренней отделкой из гипсокартонных листов. На рис. 3 можно видеть схему указанной конструкции с армированием кладки. На рис. 4 представлено температурное поле в узлах опирания перекрытий на наружные стены по приведенной на рис. 3 схеме конструкции. Из расчетов температурных полей было выявлено, что температура на внутренней поверхности откосов $\tau_{вср1} = 12,85$ °С, когда теплоизолирующий вкладыш в ряду ж/б перемычек отсутствует. Тогда удельная расчетная теплоотдача откосов оконного проема, по формулам СНиП П-3-79* или исходя из формулы 9 СП 23-101-2003, равна:

$$q_{расч1}^{г\lambda} = \alpha_b(t_b - \tau_{вср1}) = 8,7 \cdot (18 - 12,85) = 44,8 \text{ Вт/кв. м}.$$

Утепление оконных проемов кирпичных стен сплошной кладки теплоизолирующими вкладышами между ж/б перемычками позволяет понизить теплоотдачу поверхностями откосов до $\tau_{вср2} = 15,27$ °С.

Удельная расчетная теплоотдача откосов оконного проема:

$$q_{расч2}^{эфф} = \alpha_b(t_b - \tau_{вср2}) = 8,7 \cdot (18 - 15,27) = 23,75 \text{ Вт/кв. м}.$$

$$q_{расч2}^{эфф} < q_{расч1}^{эфф}. \text{ Разница составляет } 21,05 \text{ Вт/кв. м}.$$

$$\text{Суммарная теплоотдача } Q_{расч1}^{эфф} = S_1 \cdot q_{расч1}^{эфф} = 72 \text{ Вт},$$

$$Q_{расч2}^{эфф} = S_2 \cdot q_{расч2}^{эфф} = 23,75 \cdot 0,8 = 19 \text{ Вт}.$$

Теплоотдача откосов без применения теплоизолирующих вкладышей больше на $Q_{расч2}^{эфф} - Q_{расч1}^{эфф} = 72 - 19 = 53 \text{ Вт}$ для одного окна.

Таким образом, энергетически определены последствия того, что теплоизолирующие вкладыши отсутствуют. Утепление оконных проемов кирпичных стен теплоизолирующими вкладышами между ж/б перемычками позволяет понизить теплоотдачу поверхностями откосов весьма значительно, а это немаловажный «ручеек» по направлению роста энергоэффективности без каких-либо материальных затрат.

Интересен и еще один факт — о величине температурного перепада. Перепад температуры внутреннего воздуха и температуры на внутренней поверхности стены в самой «холодной» точ-

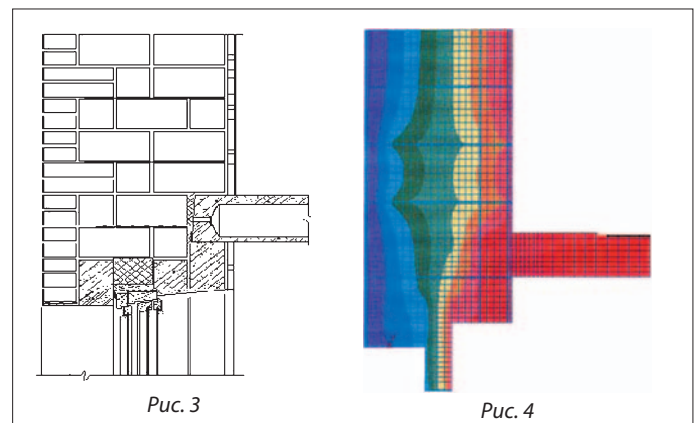


Рис. 3

Рис. 4

ке не превышает $\Delta t_b = 18 - 15,27 = 2,73 \text{ }^\circ\text{C}$. Как видно, перепад температуры внутреннего воздуха и температуры на внутренней поверхности стены в самой «холодной» точке не превышает $\Delta t_b = 2,73 \text{ }^\circ\text{C}$ (заметьте — не $4 \text{ }^\circ\text{C}$ и не $6 \text{ }^\circ\text{C}$, а именно $2,73 \text{ }^\circ\text{C}$, т. е. около $3 \text{ }^\circ\text{C}$, что подтверждается и современными обследованиями Роспотребнадзора в Санкт-Петербурге). В этой связи тепловосприятие и коэффициент тепловосприятия α_b внутренними поверхностями наружных ограждений, видимо, следует уточнять нормативно.

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ В СТЫКАХ БАЛКОННЫХ ПЛИТ И ПЕРЕКРЫТИЙ

Между торцами балконной плиты и плиты перекрытия в обязательном порядке должен быть размещен теплоизолирующий вкладыш. Из температурного поля на рис. 5 в узлах опирания перекрытий на наружные стены с оконным или дверным проемом и балконной плитой (плитой лоджии) ясно, что для случая армированной стены при наличии теплоизолирующего вкладыша $\tau_{всп} = 16,27 \text{ }^\circ\text{C}$. Ни в одной из точек на внутренней поверхности стены температура не приближается к температуре точки росы, равной $9,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Опасность конденсата отсутствует. Например, в армированной стене минимальная температура на внутренней ее поверхности $\tau_{вмин} = 15,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

И снова отмечаем, что перепад температуры внутреннего воздуха и температуры на внутренней поверхности стены в самой «холодной» точке также не превышает $3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta t_b = 18 - 15,3 = 2,7 \text{ }^\circ\text{C}$).

ЭНЕРГО- И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ КИРПИЧНЫХ СТЕН ТОЛЩИНОЙ 640 ММ ИЗ ПОРИЗОВАННОЙ КЕРАМИКИ

К сожалению, проектировщики не принимают во внимание важнейший фактор реальной работы конструкции — армирование кладки, которое весьма весомо отражается на теплопроводности конструкции. Опыт показывает, что расчет теплопроводных включений по формулам СП 23-101-2003 настолько трудоемок, что авторы проектов предпочитают такой расчет вообще не проводить и оставлять эту проблему без рассмотрения. При экспертизе проек-

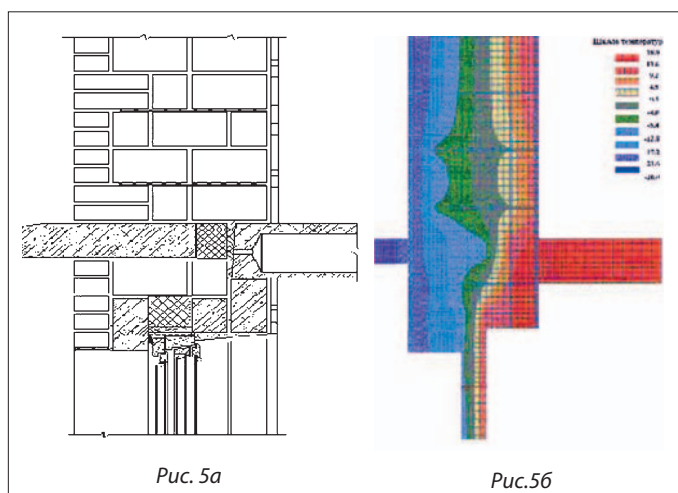


Рис. 5а

Рис.5б

тов данный вопрос не считается важным — в результатах тепловизионных обследований сдаваемых в эксплуатацию объектов всегда отмечается более низкое приведенное сопротивление теплопередаче стен в проектах тех проектных мастерских, где расчеты температурных полей «благополучно» и прочно забыты (рис. 6а).

Дорогие коллеги, во исполнение наших проектных задач считывайте температурные поля на основе электронной техники по широко известным программам, определяйте удельный тепловой поток с помощью не менее известных и физически правильных формул забытого СНиП П-3-79*, а в результате получайте реальную величину приведенного сопротивления теплопередаче!

Это и технически не сложно, и верно. В период нормативного «разлома» и «разлома» способов теплоэнергетического проектирования больше обращайтесь к физически правильным формулам справочников по теплотехнике или «старого» СНиП (рис. 6б).

Продолжение следует

А. П. КОЧНЕВ, доцент, к. т. н., зав. лабораторией экологии и акустики ОАО «ЛЕННИИПРОЕКТ»

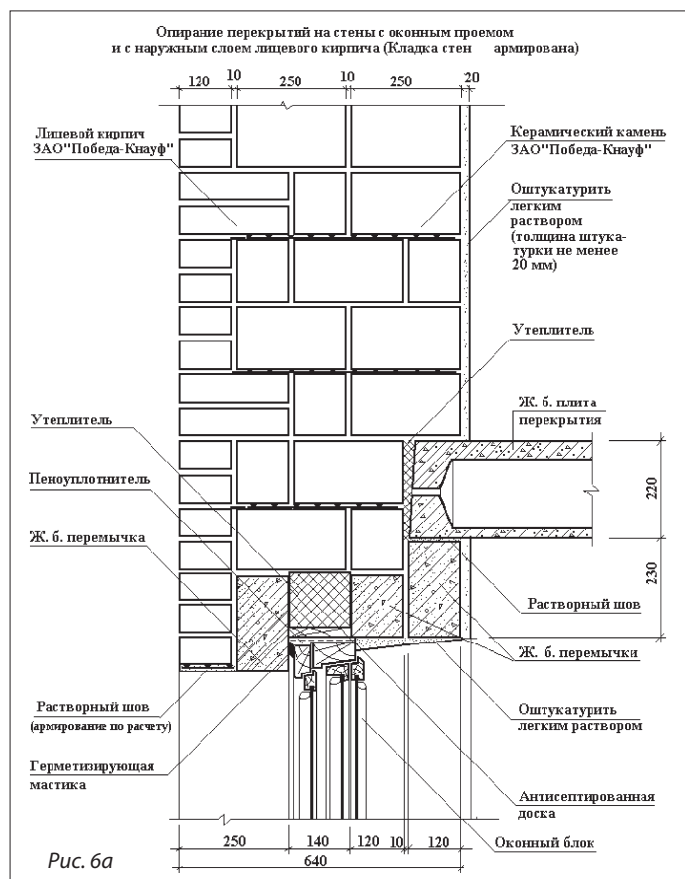


Рис. 6а

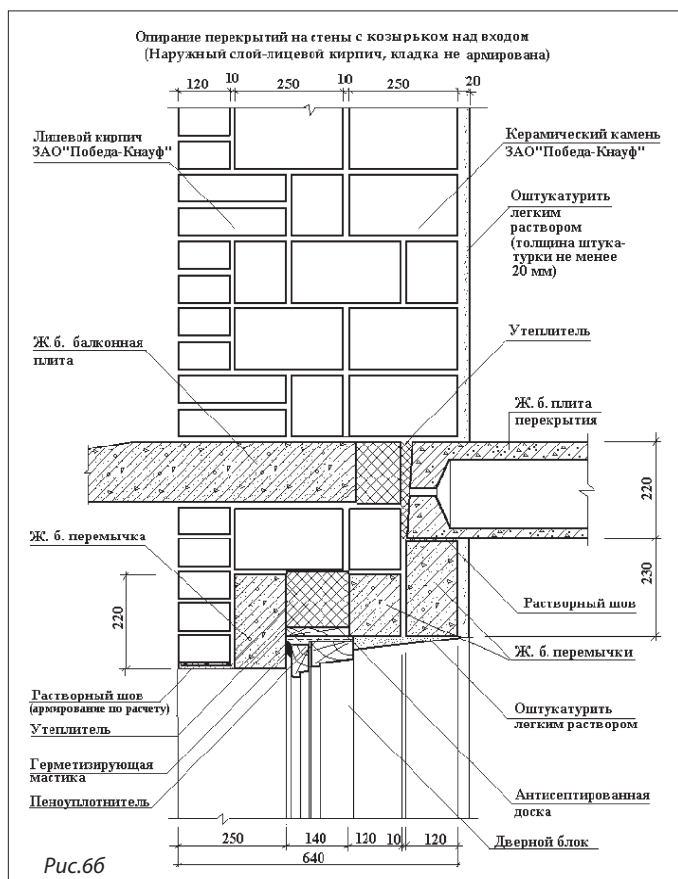


Рис.6б