

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СТЕКЛЯННОЙ ПЛАСТИНЫ И УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ СТЕКЛОПАКЕТА К ОКОННОЙ РАМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА

А.С. Миканович

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: mast1978@gmail.com

С использованием метода возможных перемещений разработана математическая модель, позволяющая описать поведение стеклопакета при воздействии на него квазистатической взрывной нагрузки. Получены уравнения, дающие возможность рассчитать напряжения на сторонах стеклопакета прямоугольной формы, рассматриваемого как мембрана с большим прогибом. Доказано, что численное значение сдвигового напряжения, возникающего в концентраторе напряжений доборного профиля, равно величине модуля сдвига для жесткого ПВХ, при этом используется доборный профиль без продольного пропила уса. Проведена оценка эффективности, в том числе экономической, применения стеклопакетов в качестве легкобрасываемых конструкций.

On the basis of the principle of virtual displacements, a mathematical model has been developed for describing the behavior of double-glazing unit when subjected to a quasi-static explosive load. The obtained equations allow to calculate the stresses on the sides of the rectangular double-glazing unit, considered as a membrane with a large deflection. It has been proved that the numerical value of the shear stress arising in the hub stress molding fillet is equal to shear modulus for rigid PVC using profile without a longitudinal molding cut whisker. The assessment of effectiveness, including economic one, has been done for using double-glazing unit as pressure relief windows.

(Поступила в редакцию 25 июля 2011 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Взрыв является одной из наиболее опасных чрезвычайных ситуаций. Как показывает статистика, такое явление возникает довольно часто, например, в государствах ЕС ежегодно происходит около 2000 взрывов [1]. Возникновение взрыва приводит как к материальному ущербу, так и к значительным человеческим жертвам, о чем свидетельствуют последствия взрыва, произошедшего 25.10.2010 года в г. Пинске на фанерной фабрике «Пинскдрев-ДСП», когда в результате взрыва погибло 14 человек, а также произошло обрушение 40 % перекрытий кровли и стеновых конструкций [2]. Несмотря на оснащение производственных объектов самыми современными средствами взрывозащиты, предотвращение взрывов не всегда представляется возможным. Как следствие, для защиты людей и материальных ценностей от опасных факторов взрыва должен быть предусмотрен комплекс мероприятий по противовзрывной защите, основным из которых является устройство легкобрасываемых конструкций (ЛСК).

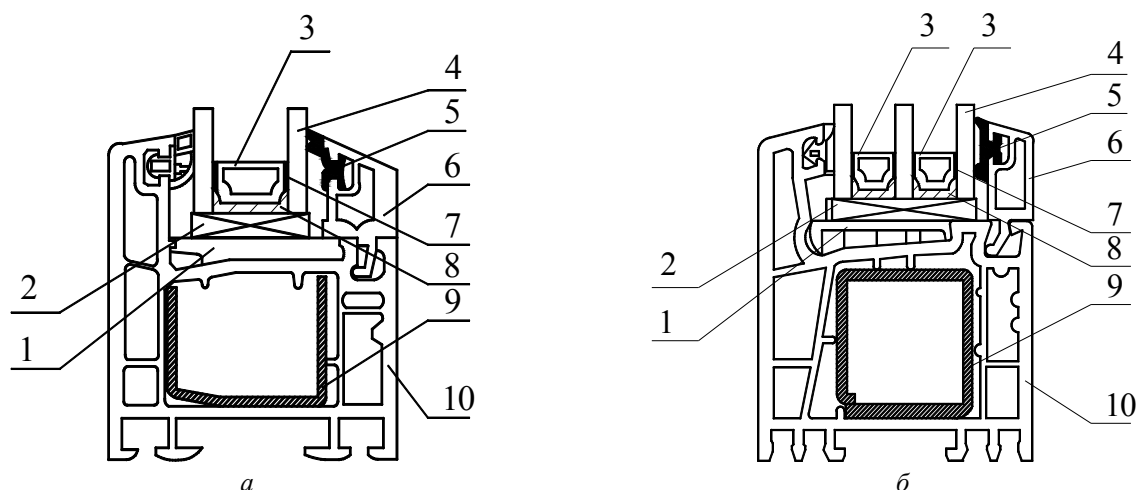
На сегодняшний день в качестве ЛСК на стадиях проектирования, строительства, реконструкции и ремонта зданий, сооружений, а также их пожарных отсеков допускается, кроме одинарного и двойного оконного остекления, легкобрасываемых стеновых панелей и покрытий, применение иных конструкций, эффективность применения которых может быть подтверждена экспериментальными или расчетными методами. К таким конструкциям относятся и стеклопакеты, эффективность использования которых в качестве ЛСК может быть подтверждена только по результатам испытаний, проводимых в соответствии с [3]. Применение данных конструкций в качестве ЛСК является актуальным, т. к. они позволяют обеспечить на должном уровне взрывозащиту помещений без снижения защищенности обслуживающего персонала, технологического и инженерного оборудования, строительных конст-

рукций здания, при этом сведя к минимуму теплопотери через элементы остекления, используемого для снижения избыточного давления взрыва.

Настоящие исследования по моделированию поведения стеклопакетов при воздействии квазистатической взрывной нагрузки проводились в Государственном учреждении образования «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь, учреждении «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь и Государственном научном учреждении «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» Национальной академии наук Беларуси. Целью работы было определение возможности использования стеклопакетов в качестве ЛСК.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Основным конструктивным решением, предлагаемым для реализации на стадии проектирования противовзрывной защиты помещения или здания, является оконный блок со стеклопакетом, состоящим из двух или трех стеклянных пластин, конструктивные решения которого приведены на рис. 1. Зазор между стеклянными пластинами обеспечивается дистанционной рамкой 3, изготовленной из алюминия или стали, которая крепится по периметру к стеклянным пластинам 4 с помощью нетвердеющего герметика 7. Для обеспечения качественной герметизации стеклопакета используется отверждающийся герметик 8. Крепление стеклопакета к оконной раме осуществляется с помощью доборного профиля (штапика) 6. Как показали результаты проведенных экспериментальных исследований, в случае установки стеклопакета доборным профилем наружу первоначально происходит разрушение продольных профилей, а затем разрушение самого стеклопакета. Следовательно, при разработке математической модели необходимо определить избыточное давление, при котором происходит разрушение узла крепления. Данное давление не должно превышать максимальное безопасное давление взрыва для человека, находящегося в замкнутом объеме [4].



a – оконный блок из профиля KBE 317;

б – оконный блок из профиля SALAMANDER системы Design 2D;

1 – фальцевый вкладыш; 2 – опорная подкладка под стеклопакет; 3 – дистанционная рамка;

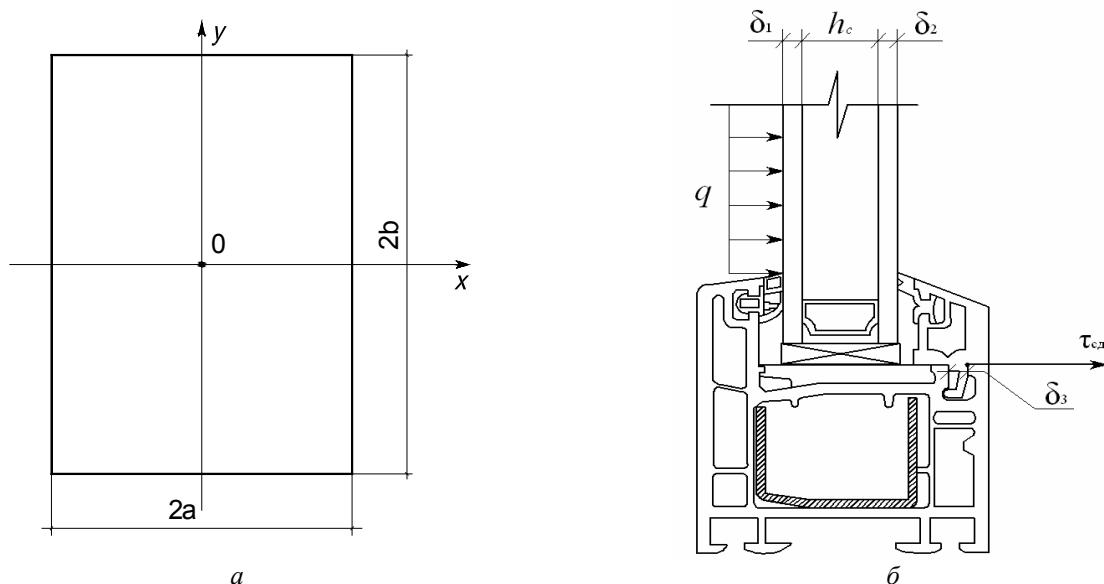
4 – стеклянная пластина; 5 – уплотнение для стекла; 6 – доборный профиль (штапик);

7 – нетвердеющий герметик (толщина – 2 мм); 8 – отверждающийся герметик;

9 – армирующий профиль; 10 – рама оконная

Рисунок 1 – Конструктивные решения испытанных оконных блоков

Стеклопакет состоит из стеклянных пластин длиной $2b$, шириной $2a$ и толщиной δ_1 и δ_2 , размещенных на расстоянии h_c , удерживаемых штапиком крепления с шириной продольного уса δ_3 . Геометрическая модель стеклянной пластины и модель воздействия избыточного давления взрыва на стеклопакет приведены на рис. 2.



a – стеклянная пластина; *б* – модель воздействия избыточного давления взрыва на стеклопакет

Рисунок 2 – Геометрическая модель стеклянной пластины и модель воздействия избыточного давления взрыва на стеклопакет

При возникновении дефлаграционного взрыва в замкнутом объеме происходит прогиб внутренней пластины стеклопакета под воздействием квазистатической взрывной нагрузки q . Приложение взрывной нагрузки q и возникновение прогиба приводят к появлению напряжений на поверхности пластины, которые могут разрушить ее. Избыточное давление взрыва через нетвердеющий герметик и дистанционную рамку передается на штапик крепления стеклопакета к оконной раме, что приводит к возникновению в штапике сдвиговых напряжений $\tau_{сд}$. Основными параметрами, влияющими на процесс разрушения штапика, являются геометрические размеры стеклопакета и штапика крепления, избыточное давление взрыва в замкнутом объеме.

Для описания поведения стеклянных пластин под воздействием квазистатической взрывной нагрузки используется уравнение [5]:

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = q + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \quad (1)$$

где D – цилиндрическая жесткость пластины, Н·мм;

w – прогиб стеклянной пластины, мм;

x, y – координаты рассматриваемой точки прогиба, мм;

q – равномерно распределенная нагрузка, Н/мм²;

N_x – вертикальная составляющая усилия, действующего в срединной плоскости пластины по оси x , Н;

N_y – вертикальная составляющая усилия, действующего в срединной плоскости пластины по оси y , Н;

N_{xy} – вертикальная составляющая усилия, действующего в срединной плоскости пластины по осям x и y , Н.

Применимость данного уравнения основывается на том, что прогиб оконных стекол и стеклопакетов под нагрузкой может быть в несколько раз больше их толщины, что подтверждается требованиями DIN 18516 [6, 7], в соответствии с которым максимальный допустимый прогиб при изгибе рекомендуется принимать не более 1 % длины большей стороны пластины, что для рассматриваемых стеклопакетов ОПЗС 1500-1200 СП, ОП2С 1500-1200 СП и ОП 1С 11,5×11,5 СП составляет 10–15 мм. Так как величина прогиба стеклянной пла-

стины превышает ее толщину, следовательно, в данном случае нельзя пренебрегать напряжениями, возникающими в срединной поверхности пластины.

При разработке математической модели поведения стеклопакета при воздействии квазистатической взрывной нагрузки был принят ряд следующих предположений:

- стеклопакет рассматривается как пластина, жестко заделанная по контуру;
- в связи с тем, что возможен прогиб внутренней стеклянной пластины на величину, большую, чем ее толщина, жесткость пластины принимается равной нулю [8], и пластина рассматривается как мембрана;
- возникающее в мембране напряжение передается на штапик без потерь через дистанционную рамку, что приводит к возникновению в штапике сдвиговых напряжений;
- численное значение сдвигового напряжения в концентраторе напряжений штапика крепления стеклопакета по своему значению равно модулю сдвига для жесткого поливинилхлорида (ПВХ) при использовании доборного профиля без продольного пропила уса.

При разработке математической модели необходимо установить:

- максимальные напряжения, возникающие в стеклянной мембране;
- возможность передачи возникающих напряжений через дистанционную рамку стеклопакета без потерь на доборный профиль (штапик).

Учитывая принятое допущение, что жесткость стеклянной пластины равна нулю, уравнение (1) преобразуется:

$$N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + q = 0. \quad (2)$$

Для решения данного уравнения используется начало возможных перемещений, примененное к полному значению потенциальной энергии мембраны [5]:

$$\Xi = \frac{1}{2} \iint (N_x \varepsilon_x + N_y \varepsilon_y + N_{xy} \varepsilon_{xy}) dx dy + T, \quad (3)$$

где $\frac{1}{2}$ – коэффициент, учитывающий то обстоятельство, что усилия в мембране возрастают от нуля до их конечной величины по закону Гука и работа этих сил на соответствующих перемещениях будет равна площади треугольника;

- ε_x – перемещения по оси x , мм;
- ε_y – перемещения по оси y , мм;
- ε_{xy} – перемещения по осям x и y , мм;
- T – потенциал нагрузки q .

Усилия N_x , N_y , N_{xy} и соответствующие им деформации ε_x , ε_y , ε_{xy} в соответствии с законом Гука, записанным для двухосного напряженного состояния, определяются следующими группами уравнений:

$$N_x = \varepsilon_x E \delta_1 + \mu_1 N_y; \quad \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2; \quad (4)$$

$$N_y = \varepsilon_y E \delta_1 + \mu_1 N_x; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2; \quad (5)$$

$$N_{xy} = \frac{\varepsilon_{xy} E \delta_1}{2(1 + \mu_1)}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (6)$$

где E – модуль Юнга стекла, Н/мм²;

μ_1 – коэффициент Пуассона для стекла.

Заменяв в подынтегральном выражении (3) усилия их выражениями через компоненты деформации, а компоненты деформации – через компоненты перемещений, получаем:

$$\begin{aligned} \Theta = & \frac{E\delta_1}{2(1-\mu_1^2)} \cdot \iint \left[\left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \frac{du}{dx} \cdot \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 + \frac{dv}{dy} \cdot \left(\frac{dw}{dy} \right)^2 \right] dx dy + \frac{E\delta_1}{2(1-\mu_1^2)} \times \\ & \times \iint \left\{ \frac{1}{4} \left[\left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dw}{dy} \right)^2 \right]^2 + 2\mu_1 \frac{du}{dx} \cdot \frac{dv}{dy} + \mu \frac{dv}{dy} \cdot \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + \mu_1 \frac{du}{dx} \cdot \left(\frac{dw}{dy} \right)^2 \right\} dx dy + \\ & + \frac{E\delta_1}{2(1-\mu_1^2)} \cdot \iint \frac{1-\mu_1}{2} \left\{ \left(\frac{du}{dy} \right)^2 + 2 \frac{du}{dy} \cdot \frac{dv}{dx} + \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + 2 \frac{du}{dy} \cdot \frac{dw}{dx} \cdot \frac{dw}{dy} \right\} dx dy + \\ & + \frac{E\delta_1}{2(1-\mu_1^2)} \cdot \iint \frac{1-\mu_1}{2} \left[2 \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dw}{dx} \cdot \frac{dw}{dy} \right] dx dy - \iint_S q w dx dy. \end{aligned} \quad (7)$$

Применяя данное выражение для решения задачи о прогибе прямоугольной мембраны со сторонами $2a$ и $2b$ и исходя из того, что прогиб w должен быть четной функцией относительно центра мембраны, примем для него следующее выражение, которое обращается в ноль на контуре [5]:

$$w = C \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b}. \quad (8)$$

Структура функций u и v определяется путем сложения результатов интегрирования выражений [5]:

$$u_1 = \int \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx; \quad u_2 = \int \left(\frac{dw}{dy} \right)^2 dx; \quad u_3 = \int \frac{dw}{dx} \cdot \frac{dw}{dy} dy; \quad (9)$$

$$v_1 = \int \left(\frac{dw}{dy} \right)^2 dy; \quad v_2 = \int \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx; \quad v_3 = \int \frac{dw}{dx} \cdot \frac{dw}{dy} dx. \quad (10)$$

Общий вид функций прогиба u и v после добавления к каждому члену неопределенного коэффициента A для функции u и B для функции v описывается уравнениями:

$$u = A_1 \cos \frac{\pi y}{b} + A_2 \sin \frac{\pi x}{a} + A_3 \sin \frac{\pi x}{a} \cos \frac{\pi y}{b}; \quad (11)$$

$$v = B_1 \cos \frac{\pi x}{a} + B_2 \sin \frac{\pi y}{b} + B_3 \sin \frac{\pi y}{b} \cos \frac{\pi x}{a}. \quad (12)$$

Граничные условия для этих перемещений принимаются следующими:

$$\text{при } x = \pm a \quad u = 0; \quad (13)$$

$$\text{при } y = \pm b \quad v = 0. \quad (14)$$

Исходя из граничных условий, получаем, что $A_1 = A_2 = A_3 = A$ и $B_1 = B_2 = B_3 = B$. Тогда функции прогиба u и v описываются следующими уравнениями:

$$u = A \cos \frac{\pi y}{b} + A \sin \frac{\pi x}{a} \left(1 + \cos \frac{\pi y}{b} \right); \quad (15)$$

$$v = B \cos \frac{\pi x}{a} + B \sin \frac{\pi y}{b} \left(1 + \cos \frac{\pi x}{a} \right). \quad (16)$$

Уравнение (7) после определения частных производных для каждого из слагаемых примет вид:

$$\begin{aligned} \mathfrak{D} = & \frac{E\delta_1}{2(1-\mu_1^2)} \pi^2 \cdot \left(\frac{3A^2b}{a} - \frac{3AC^2\pi b}{16a^2} + \frac{3B^2a}{b} - \frac{3BC^2\pi a}{16b^2} \right) + \\ & + \frac{E\delta_1}{2(1-\mu_1^2)} \pi^2 \cdot \left[\frac{(9a^4 + 9b^4 + 2a^2b^2)C^4\pi^2}{1024a^3b^3} + 2\mu AB + \frac{\mu AC^2\pi}{16a} \right] + \\ & + \frac{E\delta_1}{2(1-\mu_1^2)} \pi^2 \cdot \left[\frac{\mu BC^2\pi}{16a} + \frac{(1-\mu)A^2a}{2b} + \frac{(1-\mu)B^2b}{2a} \right] + \\ & + \frac{E\delta_1}{2(1-\mu_1^2)} \pi^2 \cdot \left[(1-\mu)AB - \frac{(1-\mu)AC^2\pi}{16a} + \frac{(1-\mu)BC^2\pi}{16a} \right] - qC \frac{16ab}{\pi^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для определения параметров A , B и C применим к полученному выражению полной энергии (17) начало возможных перемещений, в результате чего получим следующие уравнения:

$$\frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial A} = 0; \quad \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial B} = 0; \quad \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial C} = 0. \quad (18)$$

Из решения данных уравнений находим:

$$A = \frac{C^2 \pi k_{gp}}{32 a j_{gp}}; \quad (19)$$

$$B = \frac{C^2 \pi m_{gp}}{32 b j_{gp}}; \quad (20)$$

$$C = \frac{16ab}{\pi^2} \sqrt[3]{\frac{2ab \cdot q \cdot j_{gp} (1 - \mu_1^2)}{E\delta_1 (r_{gp} j_{gp} - k_{gp} s_{gp} b - m_{gp} t_{gp} a)}}, \quad (21)$$

где A, B, C – расчетные параметры, мм;

$$j_{gp} = -18a^2b^2 - 3a^4 + 3\mu_1b^4 - 3b^4 + 3\mu_1a^4 + 2\mu_1a^2b^2, \text{ мм}^4;$$

$$k_{gp} = -3b^4 - 3a^4 - 18a^2b^2 + 3\mu_1b^4 + 2\mu_1a^2b^2 + 9\mu_1a^4 - 2\mu_1^2a^2b^2 + 5\mu_1a^3b + \mu_1ab^3 - \mu_1^2a^3b - \mu_1^2ab^3, \text{ мм}^4;$$

$$m_{gp} = -3b^4 - 3a^4 - 18a^2b^2 + 3\mu_1a^4 + 2\mu_1a^2b^2 + 9\mu_1b^4 - 2\mu_1^2a^2b^2 + 5\mu_1ab^3 + \mu_1a^3b - \mu_1^2a^3b - \mu_1^2ab^3, \text{ мм}^4;$$

$$r_{gp} = 9a^4 + 9b^4 + 2a^2b^2, \text{ мм}^3$$

$$s_{gp} = 3b^3 + a^2b - \mu_1 ab^2 - \mu_1 a^2b, \text{ мм}^3;$$

$$t_{gp} = 3a^3 + ab^2 - \mu_1 ab^2 - \mu_1 a^2b, \text{ мм}^3.$$

Деформации ϵ_x , ϵ_y , усилия N_x , N_y и соответствующие им напряжения σ_x и σ_y определяются по формулам:

$$\epsilon_x = \cos^2 \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \left(\frac{4A\pi}{a} - \frac{C^2 \pi^2}{8a^2} \right) + \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \left(\frac{C^2 \pi^2}{8a^2} - \frac{2A\pi}{a} \right); \quad (22)$$

$$\epsilon_y = \cos^2 \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \left(\frac{4B\pi}{b} - \frac{C^2 \pi^2}{8b^2} \right) + \cos^2 \frac{\pi x}{2a} \left(\frac{C^2 \pi^2}{8b^2} - \frac{2B\pi}{b} \right); \quad (23)$$

$$N_x = 2\xi \cdot \left[\cos^2 \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \left(\frac{4A\pi}{a} - \frac{C^2 \pi^2}{8a^2} \right) + \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \left(\frac{C^2 \pi^2}{8a^2} - \frac{2A\pi}{a} \right) \right] + 2\xi \cdot \left[\cos^2 \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \mu_1 \left(\frac{4B\pi}{b} - \frac{C^2 \pi^2}{8b^2} \right) + \cos^2 \frac{\pi x}{2a} \mu_1 \left(\frac{C^2 \pi^2}{8b^2} - \frac{2B\pi}{b} \right) \right]; \quad (24)$$

$$N_y = 2\xi \cdot \left[\cos^2 \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \left(\frac{4B\pi}{b} - \frac{C^2 \pi^2}{8b^2} \right) + \cos^2 \frac{\pi x}{2a} \left(\frac{C^2 \pi^2}{8b^2} - \frac{2B\pi}{b} \right) \right] + 2\xi \cdot \left[\cos^2 \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \mu_1 \left(\frac{4A\pi}{a} - \frac{C^2 \pi^2}{8a^2} \right) + \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \mu_1 \left(\frac{C^2 \pi^2}{8a^2} - \frac{2A\pi}{a} \right) \right]; \quad (25)$$

$$\sigma_x = 2\xi \cdot \left[\cos^2 \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \left(\frac{4A\pi}{a} - \frac{C^2 \pi^2}{8a^2} \right) + \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \left(\frac{C^2 \pi^2}{8a^2} - \frac{2A\pi}{a} \right) \right] + 2\xi \cdot \left[\cos^2 \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \mu_1 \left(\frac{4B\pi}{b} - \frac{C^2 \pi^2}{8b^2} \right) + \cos^2 \frac{\pi x}{2a} \mu_1 \left(\frac{C^2 \pi^2}{8b^2} - \frac{2B\pi}{b} \right) \right]; \quad (26)$$

$$\sigma_y = 2\xi \cdot \left[\cos^2 \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \left(\frac{4B\pi}{b} - \frac{C^2 \pi^2}{8b^2} \right) + \cos^2 \frac{\pi x}{2a} \left(\frac{C^2 \pi^2}{8b^2} - \frac{2B\pi}{b} \right) \right] + 2\xi \cdot \left[\cos^2 \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \mu_1 \left(\frac{4A\pi}{a} - \frac{C^2 \pi^2}{8a^2} \right) + \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \mu_1 \left(\frac{C^2 \pi^2}{8a^2} - \frac{2A\pi}{a} \right) \right]; \quad (27)$$

где $\xi = \frac{E\delta_1}{2(1-\mu_1^2)}$.

Возможность передачи возникающих на внутренней мембране напряжений через дистанционную рамку на следующую мембрану и далее на ПВХ штапик без потерь оценивается исходя из следующих предпосылок. Дистанционная рамка представляет собой, как правило, сварной алюминиевый профиль (металлическая составляющая – 97 %) стандартной конфигурации шириной от 6 до 20 мм (шаг по ширине – 2 мм) с двухрядной перфорацией в виде прямоугольных отверстий 2×1 мм, выполненных с шагом 2 мм. Внутри рамки засыпан влагопоглотитель, в качестве которого могут использоваться силикоген или молекулярное сито [7, 9, 10]. Толщина стенок рамки зависит от способа соединения ее комплектующих в цельное изделие и составляет 0,3 мм для соединения уголками и 0,35 мм для гибки [9, 11].

Построение расчетной модели для определения возможности и величины деформации дистанционной рамки основывалось на положениях [8, 12, 13], в соответствии с которыми верхняя перемычка дистанционной рамки рассмотрена как имеющая два свободных края и два упруго опертых и упруго защемленных края. Ширина пластины принимается равной ширине дистанционной рамки за вычетом двух толщин стенки вертикальных свесов. Учитывая тот факт, что при изготовлении стеклопакета используется отверждающийся герметик, оценка величины прогиба верхнего профиля дистанционной рамки проводилась по уравнению (28), как для жестко защемленной по контуру прямоугольной пластинки, нагруженной поперечной равномерно распределенной нагрузкой [8]:

$$w_{\max} = \psi \frac{qb^4}{D}, \quad (28)$$

где ψ – коэффициент, численное значение которого зависит от соотношения сторон пластины;
 q – избыточное давление взрыва, Н/мм²;
 b – ширина верхней перемычки дистанционной рамки, мм;
 D – цилиндрическая жесткость верхней перемычки дистанционной рамки, Н·мм.

Отношения длины дистанционной рамки, размещаемой по стороне $2b$ стеклянной пластины, к ее ширине составляют 250,94 для стеклопакетов с шириной дистанционной рамки 6 мм, 117,7 – для стеклопакетов с шириной дистанционной рамки 12 мм, а для дистанционных рамок, размещаемых по стороне $2a$ стеклянной пластины, – 200 и 94,74 соответственно. Так как рассчитанные отношения превышают 2, численные значения коэффициента ψ принимается равным 0,0026.

Цилиндрическая жесткость верхней перемычки дистанционной рамки определяется по формуле

$$D = \frac{E_1 \delta^3}{12(1 - \mu_2^2)}, \quad (29)$$

где E_1 – модуль Юнга для алюминия, принимается равным 72 000 МПа [14, 15];

δ – толщина верхней перемычки дистанционной рамки, мм;

μ_2 – коэффициент Пуассона для алюминия, принимается равным 0,3 [15].

Для дистанционных рамок, соединяемых уголками, цилиндрическая жесткость составляет 178,02 Н·мм, а для гибочных рамок – 282,69 Н·мм. Приложенная к пластинке равномерно распределенная нагрузка принималась максимальной из измеренных для группы стеклопакетов с одинаковой шириной дистанционной рамки и определялась по результатам испытаний [16, 17]. Максимальный расчетный прогиб для верхней перемычки дистанционной рамки, располагаемой по стороне $2b$ стеклянной пластины, составил $6,8 \cdot 10^{-5}$ мм для гибочных рамок стеклопакетов с шириной рамки 6 мм и $1,4 \cdot 10^{-3}$ мм для гибочных рамок стеклопакетов с шириной рамки 12 мм, а при использовании дистанционных рамок соединяемых уголками – $1,04 \cdot 10^{-3}$ мм и $7,47 \cdot 10^{-3}$ мм соответственно. Для дистанционных рамок, соединяемых уголками и располагаемых по стороне $2a$, максимальный прогиб составляет $1,13 \cdot 10^{-4}$ мм для дистанционной рамки шириной 6 мм и $2,24 \cdot 10^{-3}$ мм – для дистанционной рамки шириной 12 мм. Для гибочных дистанционных рамок, располагаемых по стороне $2a$, максимальный прогиб составляет $6,6 \cdot 10^{-5}$ мм и $1,36 \cdot 10^{-3}$ мм соответственно.

Проведенный расчет подтверждает выдвинутое предположение о том, что возникающее в мембране напряжение передается через дистанционную рамку на штапик без потерь, т. к. величина максимального прогиба верхней перемычки дистанционной рамки не превышает 2,5 % толщины перемычки.

Допущение о том, что численное значение сдвигового напряжения в концентраторе напряжений штапика крепления стеклопакета без продольного пропила уса по своему значе-

нию равно модулю сдвига для жесткого ПВХ, основывалось на формах штапиков, используемых для крепления стеклопакета. В связи с тем, что доборный профиль может быть рассмотрен как конструкция с тавровым сечением, а сопряжение стенки с полкой осуществляется под углом 90° , в точках входящих углов сечения касательные напряжения теоретически достигают больших значений [18]. Опираясь на вышеизложенное было выдвинуто предположение о том, что в концентраторе напряжения наблюдается увеличение напряжения в количестве раз, равное отношению модуля сдвига к нормальному напряжению по оси x . Численное значение модуля сдвига определялось по формуле [19]:

$$G = \frac{E_2}{2(1+\mu_3)}, \quad (30)$$

где G – модуль сдвига ПВХ, Н/мм²;
 E_2 – модуль Юнга ПВХ, Н/мм²;
 μ_3 – коэффициент Пуассона ПВХ.

ПВХ профили для окон, в т. ч. и доборные профили (штапики), в соответствии с требованиями [20] должны изготавливаться методом экструзии из непластифицированного ПВХ с модулем упругости при растяжении не менее 2,2 ГПа, что позволяет отнести используемый при изготовлении поливинилхлорид к жесткому полимерному материалу [21]. Численное значение коэффициента Пуассона для жесткого ПВХ находится в интервале от 0,4 до 0,44 [22]. Расчетные значения модуля сдвига для жесткого ПВХ, используемого при изготовлении стеклопакетов, рассчитанные по формуле (30), находятся в интервале от 764 до 786 МПа.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработка результатов измерений проводилась в соответствии с [23]. Расчет избыточного давления вскрытия стеклопакетов проводился с использованием следующих исходных данных:

– стеклянная пластина: модуль Юнга – 70 000 МПа [24]; коэффициент Пуассона – 0,2 [24]; толщина – 4 мм; площадь – 1 412 704 мм² (для стеклопакетов СП-1–СП-5) и 1 000 000 мм² (для стеклопакета СП-6);

– доборный профиль из жесткого ПВХ: модуль сдвига – 775 МПа; коэффициент Пуассона – 0,42 [22]; толщина продольного уса штапика – 2,5 мм (без подрезки) и 1,5 мм (с подрезкой); длина опорного контура – 4792 мм (для стеклопакетов СП-1 – СП-5) и 4000 мм (для стеклопакета СП-6).

Избыточное давление вскрытия стеклопакета определялось по формуле

$$P = \frac{\delta_3 \sigma_{x(\max)} l_{\text{ок}}}{S_{\text{ст}} k}, \quad (31)$$

где δ_3 – толщина уса доборного профиля, мм

$\sigma_{x(\max)}$ – максимальное напряжение в середине пластины по ее длинной стороне, Н/мм², определяется по формуле (26);

$l_{\text{ок}}$ – длина опорного контура, мм;

$S_{\text{ст}}$ – площадь стеклянной пластины, мм²;

k – расчетный коэффициент.

Для стеклопакетов, не имеющих подрезки продольного уса штапика, численное значение расчетного коэффициента k определяется как отношение модуля сдвига к максимальному напряжению пластины по ее длинной стороне.

Результаты обработки первой серии испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерений избыточного давления вскрытия стеклопакетов

Номер образца и его характеристики	Измеренное избыточное давление вскрытия \tilde{P} , кПа	Нижняя граница доверительного интервала, кПа	Расчетное избыточное давление вскрытия P , кПа	Верхняя граница доверительного интервала, кПа	Число измерений, n
СП-1. Оконный блок глухой марки ОПЗС 1500-1200 СП СТБ 1108-98. Стеклопакет марки СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 (1390×1090×32) по ГОСТ 24866-99, стекло листовое марки М1 по ГОСТ 111-2001, профиль ПВХ (SALAMANDER системы Design 2D производства Германии)	7,88	7,34	7,40	8,41	4
СП-2. Оконный блок глухой марки ОПЗС 1500-1200 СП СТБ 1108-98. Стеклопакет марки СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 (1390×1090×32) по ГОСТ 24866-99, стекло листовое марки М1 по ГОСТ 111-2001, профиль ПВХ (SALAMANDER системы Design 2D производства Германия). Снаружи стеклопакет оклеен полимерной пленкой LCL-800XSR (производство США)	8,63	8,04	8,36	9,21	4
СП-3. Оконный блок глухой марки ОПЗС 1500-1200 СП СТБ 1108-98. Стеклопакет марки СПО 4,204М1-16-4М1 (1310×1021×24,204) по ГОСТ 24866-99, стекло листовое по ГОСТ 111-2001, профиль ПВХ (КВЕ 317) рама – 707, штапик – 0,33 (производство РФ)	7,23	6,64	6,60	7,81	4
СП-4. Оконный блок глухой марки ОПЗС 1500-1200 СП СТБ 1108-98. Стеклопакет марки СПО 4,204М1-16-4М1 (1310×1021×24,204) по ГОСТ 24866-99, стекло листовое по ГОСТ 111-2001 ударостойкое А1, профиль ПВХ (КВЕ 317) рама – 707, штапик – 0,33 (производство РФ)	7,90	7,24	7,43	8,56	4
СП-5. Оконный блок глухой марки ОПЗС 1500-1200 СП СТБ 1108-98. Стеклопакет марки СПО 4,204М1-16-4М1 (1310×1021×24,204) по ГОСТ 24866-99, стекло листовое по ГОСТ 111-2001, профиль ПВХ (КВЕ 317) рама – 707, штапик – 0,33 (производство РФ). Снаружи стеклопакет оклеен полимерной пленкой LCL-800XSR (производство США)	8,95	8,34	8,77	9,56	4

В случае использования доборного профиля с пропилом продольного уса значение расчетного коэффициента k принимается равным отношению критического напряжения в вершине трещины к расчетному значению напряжения, определяемого в середине длинной стороны стеклопакета. В этом случае численное значение коэффициента k зависит от ряда параметров, в т. ч. от геометрии трещины, а также величины изгибающих и растягивающих

напряжений, возникающих из-за конечного момента сил, действующих на штапик. Численное значение коэффициента k для испытанных стеклопакетов СП-1 и СП-3 равно 23 (избыточное давление вскрытия – 3,1 и 3,03 кПа соответственно) при использовании доборного профиля с продольным пропилом, а для стеклопакета СП-6 (марки 6P1A-14Ag-И4 (1041×1041×24)) – 18,15 (избыточное давление вскрытия – 4,83 кПа).

Вывод: разработанная математическая модель позволяет расчетным методом проводить адекватную оценку поведения стеклопакета при воздействии на него квазистатической взрывной нагрузки со стороны замкнутого объема, в случае установки доборного профиля со стороны, противоположной приложению давления. В результате проведенного математического моделирования была подтверждена гипотеза, что напряжение, возникающее в концентраторе напряжений доборного профиля без продольного пропила уса, по своему численному значению соответствует модулю сдвига для жесткого ПВХ.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТЕКЛОПАКЕТОВ В КАЧЕСТВЕ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для определения эффективности, в т. ч. экономической, применения в качестве ЛСК стеклопакетов были проведены сравнительные расчеты по общему методу с целью определению проектной площади ЛСК для помещений объемом 100 и 1000 м³ при образовании внутри защищаемых объемов газо-, паро- и пылевоздушных смесей, при этом принято, что расчетный объект находится в г. Минске или Минской области. Для оценки площади ЛСК использовалась методика, разработанная д. т. н., проф. Л.П. Пилюгиным, адаптированная к применению на территории Республики Беларусь. В соответствии с данной методикой площадь ЛСК определяется по формулам [25]:

$$\sum_{i=1}^n S_{ЛСК_i} \cdot K_{вскр.i}^{ЛСК} \geq S_{min}^{ЛСК} \quad (32)$$

$$S_{min}^{ЛСК} = \frac{0,105 \cdot U_{н.р.} \cdot \alpha \cdot (\varepsilon_c - 1) \cdot \beta_\mu \cdot K_\phi \cdot \sqrt[3]{V_{св}^2} \cdot \sqrt{\rho_0}}{\sqrt{\Delta P_{доп}}} \quad (33)$$

где n – количество типов ЛСК;

$S_{ЛСК_i}$ – площадь ЛСК i -го типа в наружных ограждающих конструкциях помещения, м²;

$K_{вскр.i}^{ЛСК}$ – коэффициент вскрытия ЛСК i -го типа;

$S_{min}^{ЛСК}$ – минимальная площадь ЛСК, м², определяемая по формуле (33);

$U_{н.р.}$ – расчетная нормальная скорость распространения пламени, м/с;

α – показатель интенсификации взрывного горения;

ε_c – расчетная степень сжатия продуктов горения при взрыве в замкнутом объеме;

β_μ – коэффициент, учитывающий степень заполнения объема помещения взрывоопасной смесью;

K_ϕ – коэффициент, учитывающий влияние формы помещения и эффект истечения продуктов горения взрывоопасной смеси;

$V_{св}$ – свободный объем помещения, м³;

ρ_0 – расчетная плотность газа в помещении перед воспламенением, кг/м³;

$\Delta P_{доп}$ – допустимое избыточное давление в помещении при горении взрывоопасной смеси, кПа.

В качестве заполнения оконного проема был выбран оконный блок глухой 15-12 по [26] с одинарным, двойным остеклением и стеклопакетом. Материал оконного блока – ПВХ,

ширина деталей коробки – 70 мм, габариты оконного проема – 1520×1210 мм, толщина стеклянной пластины – 4 мм, приведенное давление вскрытия оконного остекления – 12,53 кПа, масса вещества, участвующего во взрыве, определялась на основании расчетной методики, изложенной в [27], при этом избыточное давление взрыва было принято минимальным (5,01 кПа) для возможности отнесения помещения к категории А или Б по взрывопожарной и пожарной опасности. Результаты сравнительных расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Требуемая площадь ЛСК при использовании одинарного, двойного остекления и стеклопакетов

Вещество	$V_{\text{пом}}, \text{м}^3$	$S_{\text{ЛСК}}^{\text{од}}, \text{м}^2$	$S_{\text{ЛСК}}^{\text{дв}}, \text{м}^2$	$S_{\text{ЛСК}}^{\text{СП}}, \text{м}^2$
Аммиак	100	0,14	0,93	0,12
	1000	1,28	8,83	1,09
Ацетилен	100	1,08	7,43	0,92
	1000	10,93	75,38	9,30
Водород	100	3,26	22,45	2,77
	1000	34,79	239,92	29,61
Пропан	100	0,22	1,50	0,19
	1000	2,11	14,59	1,80
Ацетон	100	0,53	3,63	0,45
	1000	5,50	37,93	4,68
Сероуглерод	100	0,73	5,01	0,62
	1000	6,62	45,67	5,64
Этанол	100	0,53	3,66	0,45
	1000	4,88	33,65	4,15
Этилацетат	100	0,25	1,73	0,21
	1000	2,34	16,14	1,99
Бутилацетат	100	0,32	2,19	0,27
	1000	2,94	20,27	2,50
Уайт-спирит	100	0,27	1,88	0,23
	1000	2,52	17,41	2,15
Древесная пыль	100	0,18	1,23	0,15
	1000	3,22	22,2	2,74
Мука пшеничная в/с	100	0,06	0,38	0,05
	1000	1,02	7,03	0,87

Примечания:

1. $S_{\text{ЛСК}}^{\text{од}}$ – требуемая площадь ЛСК при устройстве в защищаемом объеме одинарного остекления;
2. $S_{\text{ЛСК}}^{\text{дв}}$ – требуемая площадь ЛСК при устройстве в защищаемом объеме двойного остекления;
3. $S_{\text{ЛСК}}^{\text{СП}}$ – требуемая площадь ЛСК при устройстве в защищаемом объеме стеклопакетов.

Из приведенной таблицы следует, что при использовании стеклопакетов с коэффициентом вскрытия от 0,92 до 0,94 возможно снижение проектной площади ЛСК без снижения защищенности обслуживающего персонала, строительных конструкций здания, инженерного и технологического оборудования от опасных факторов взрыва на 13,6–16,7 % по отношению к площади одинарного остекления и на 86,8–87,7 % по отношению к двойному остеклению.

Для обоснования экономической эффективности использования стеклопакетов в качестве ЛСК для взрывозащиты производственных и складских помещений и зданий взрывопожароопасных категорий на основании требований и методик, изложенных в [28, 29], был проведен сравнительный расчет теплопотерь на 1 м² площади ЛСК при использовании одинарного, двойного остекления и стеклопакетов. При проведении расчетов температура в наиболее холодный период года принималась равной –24 °С по таблице 4.3 [28] для наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92, температура воздуха в производственном помещении – +16 °С по таблице 1 [30], сопротивление теплопередаче принималось в соответствии с таблицей Г.1 [28] для одинарного остекления в интервале от 0,15 до 0,18 м²·°С·Вт⁻¹, для двойного – 0,31–0,42 м²·°С·Вт⁻¹, для стеклопакетов – 0,6 м²·°С·Вт⁻¹. Результаты сравнительного расчета теплопотерь приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Сравнительный расчет теплопотерь через ЛСК при использовании одинарного, двойного остекления и стеклопакетов

Вид остекления	Теплопотери, Вт/м ²	Теплопотери, кг у. т./м ² ·год
Одинарное	222,22–266,67	129,71–155,66
Двойное	95,24–129,03	55,59–75,31
Стеклопакет	≤ 66,67	≤ 38,90

Как показывают результаты проведенных расчетов, в случае использования стеклопакетов в качестве ЛСК, существует возможность экономии от 90,81 до 116,76 кг у. т./м²·год при замене одинарного остекления и от 16,69 до 36,41 кг у. т./м²·год при замене двойного остекления. Относительная погрешность проведенных расчетов по экономии условного топлива в зависимости от изменения продолжительности отопительного периода для каждого из расчетных регионов Республики Беларусь не превышает 4,5 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана математическая модель, описывающая поведение стеклопакета при дефлаграционном взрыве в замкнутом объеме, позволяющая расчетным методом определять избыточное давление вскрытия данного вида ЛСК. В соответствии с разработанной математической моделью стеклопакет рассматривается как мембрана, жестко заделанная по контуру.

При проведении исследований было экспериментально получено и математически доказано, что возникающие в мембране напряжения передаются на штапик без потерь через дистанционную рамку, что приводит к возникновению в доборном профиле (штапике) сдвиговых напряжений. Численное значение сдвигового напряжения в концентраторе напряжений доборного профиля крепления стеклопакета по своему значению равно модулю сдвига для жесткого ПВХ.

На основании проведенных сравнительных расчетов установлено, что при использовании стеклопакетов возможно снижение проектной площади ЛСК без снижения защищенности обслуживающего персонала, строительных конструкций здания, инженерного и технологического оборудования от опасных факторов взрыва на 13,6–16,7 % по отношению к площади одинарного остекления и на 86,8–87,7 % по отношению к двойному остеклению, при этом снижение теплопотерь через 1 м² площади остекления составит от 27,86 до 195 Вт, что позволит сэкономить от 90,81 до 116,76 кг у. т./м²·год при замене одинарного остекления и от 16,69 до 36,41 кг у. т./м²·год при замене двойного остекления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование пожаров и взрывов / под общ. ред. Н.Н. Брушлинского, А.Я. Корольченко. – М. : Ассоциация «Пожнаука», 2000. – 482 с.
2. На фабрике «Пинскдрев» прогремел взрыв: трое погибших и 19 раненых // Новости Беларуси. Белорусское телеграфное агентство [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: http://www.belta.by/ru/all_news/society/Na-fabrike-Pinskdrev-progremel-vzryv-1-pogibshij-i-18-ranenых_i_528976.html. – Дата доступа: 25.10.2010.
3. Конструкции легкобрасываемые. Метод определения избыточного давления вскрытия : СТБ 1762-2007 // Полнотекстовая информационно-поисковая система «Строй-ДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
4. Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования : СТБ П 11.05.03-2006. – Введ. 01.02.07. – Минск : Гос. комитет по стандартизации Респ. Беларусь : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2006. – 65 с.

5. Авдонин, А.С. Прикладные методы расчета оболочек и тонкостенных конструкций / А.С. Авдонин. – М. : Машиностроение, 1969. – 403 с.
6. Прочностные свойства стекла. Несущая способность. Расчет на прочность. Допустимые напряжения при изгибе [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.okna-grad.ru/download/papers/boroskina-prochnost-stekla-v-oknah-pvh.doc>. – Дата доступа: 09.04.2010.
7. Борискина, И.В. Окна для индивидуального строительства. Техническое руководство по проектированию современных окон из ПВХ для объектов коттеджного строительства и зданий малоэтажной застройки / И.В. Борискина, А.Н. Щуров, А.А. Плотников. – М., 2010. – 320 с.
8. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М. : Наука, 1966. – 636 с.
9. БЕЛТУРПРО. Продукция [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.belturpro.by/ru/3>. – Дата доступа: 29.05.2011.
10. Атлас окон [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: http://www.atlasokon.com.ua/izgot_paket.htm. – Дата доступа: 03.07.2011.
11. Компания ВКС. Комплекующие для стеклопакетов [Электронный ресурс]. – 2011. Режим доступа: http://www.vks.ru/vks/katalog/steklopaket_f.htm. – Дата доступа: 03.07.2011.
12. ТКП EN 1993-1-3-2009 Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск : НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
13. ТКП EN 1999-1-4-2009 Еврокод 9. Проектирование алюминиевых конструкций. Часть 1-4. Холодноформованные профильные листы // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск : НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
14. Материалы рам. Титан, алюминий, сталь, магний [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://lexaparkov.myl.ru/publ/4-1-0-9>. – Дата доступа: 03.07.2011.
15. СНиП 2.03.06-85 Алюминиевые конструкции // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск : НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
16. Определение избыточного давления вскрытия оконных блоков при дефлаграционном взрыве в замкнутом объеме / О.Г. Пенязьков [и др.] // Вестн. Командно-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2007. – № 1 (5). – С. 65–74.
17. Усов, А.М. Разработать методику и испытательную установку по определению избыточного давления вскрытия заполнений проемов вертикальных строительных конструкций [текст] (Отчет о НИР № ГР 200667) / А.М. Усов [и др.] ; НИИ ПБиЧС МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2007. – 86 с. – Рус. – Деп в ГУ «БелИСА» 21.02.2007, № Д200712.
18. Сопромат [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://distance.net.ua/Russia/Sopromat/lekcja/razdel8/urok9.htm>. – Дата доступа: 17.07.2011.
19. Виды брака в производстве стекла / Х. Бах [и др.] ; под ред. Г. Иебсена-Марведеля и Р. Брюкнера; сокр. пер. с нем. Л.Г. Байбурт и др.; под ред. Н.Н. Рохлина. – М. : Стройиздат, 1986. – 648 с., ил. – Перевод. изд. : Glastechnische Fabrikationsfehler / Herausgegeben von Hans Jebesen & Marwedel und Rolf Brückner, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, N.Y.
20. Профили поливинилхлоридные для окон и дверей. Технические условия : СТБ 1264-2001 // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск : НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

21. Марков, А.В. Принципы выбора полимерных материалов для изготовления изделий / А.В. Марков, С.В. Власов // Полимерные материалы. Изделия. Оборудование. Технологии : Специализированный информ. бюл. – 2004. – № 6 (61). – С. 17–19.

22. Overview of materials for PVC, Rigid Grade [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=69642362cb864d25b8f6eb9d02092ecf>. – Дата доступа: 17.07.2011.

23. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения : ГОСТ 8.207-76. – Введ. 01.01.1977. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 9 с.

24. ГОСТ 111-2001 Стекло листовое. Технические условия // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск : НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

25. Расчет площади мгновенно разрушаемых легкобрасываемых конструкций / Г.И. Касперов [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2004. – № 6 (16). – С. 105–110.

26. Окна и балконные двери из поливинилхлоридного профиля. Общие технические условия : СТБ 1108-98 // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск : НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

27. Нормы пожарной безопасности Республики Беларусь. Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : НПБ 5-2005: [утв. Гос. пожар. надзором 28.04.2006]. – Введ. 01.07.06. – Минск : НИИ ПбЧС МЧС Респ. Беларусь, 2005. – 44 с.

28. Национальный комплекс технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-2.04-43-2006. – Введ. 01.07.07. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2007. – 35 с.

29. Национальный комплекс нормативно-технических документов в строительстве. Строительные нормы Республики Беларусь. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : СНБ 4.02.01-03. – Введ. 01.01.05. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2004. – 81 с.

30. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: СанПиН 9-80 РБ 98 : [утв. пост. Гл. гос. сан. врача Респ. Беларусь 25.03.1999]. – Введ. с момента опубликования. – Минск, 1998. – 16 с.