

DOI: <https://doi.org/10.54422/1994-439X.2021.2-50.100-108>

УДК 614.839::628.924::539.415::539.422.23

канд. техн. наук, доц. Миканович А.С., Алиев К.С.

Моделирование поведения легкобрасываемой конструкции в программном комплексе ANSYS

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», г. Минск

На примере легкобрасываемой конструкции в виде стеклопакета, имеющего ряд конструктивных особенностей, рассмотрена возможность образования «пятна контакта» стеклянных пластин при приложении квазистатической нагрузки, образующейся при дефлаграционном сгорании в защищаемом объеме. Определение величины прогиба внутренней стеклянной пластины осуществлялось с помощью метода начала возможных перемещений и при моделировании в программном комплексе ANSYS Workbench.

Ключевые слова: легкобрасываемая конструкция, дефлаграционное сгорание, прогиб стеклянных пластин

Ph.D. (Tech.), Assoc. Prof. A.S. Mikanovich, K.S. Aliev

Modeling the behavior of an easily resettable structure in the ANSYS software package

The state educational establishment «University of civil protection of the Ministry of emergency situations of the Republic of Belarus», Minsk

In the article, using the example of an easily resettable structure in the form of a double-glazed window, which has a number of design features, the possibility of the formation of a "contact spot" of glass plates when a quasi-static load is applied, formed during deflagration combustion in a protected volume, is considered. Determination of the deflection value of the inner glass plate was carried out using the method of the beginning of possible displacements and during simulation in the ANSYS Workbench software package.

Keywords: easily ejected structure, deflagration combustion, deflection of glass plates

Введение

Взрыв является одной из наиболее опасных аварий, приводящих к чрезвычайной ситуации. Взрывозащита производственных и складских помещений, зданий на стадии проектирования решается комплексным применением различных технологи-

ческих, объемно-планировочных и конструктивных решений.

Несмотря на оснащение производственных объектов 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, одним из конструктивных решений которого является устройство легко-сбрасываемых конструкций (далее – ЛСК).

ЛСК – специальные наружные ограждающие конструкции зданий, сооружений (или их части), предназначенные для уменьшения давления при взрыве с целью обеспечения безопасности людей, сохранности конструкций и оборудования [1]. ЛСК, вскрываясь, обеспечивают снижение избыточного давления, возникающего в помещении при дефлаграционном сгорании горючей смеси, до безопасного нормируемого значения, которое в большинстве случаев принимается равным 5 кПа [2, 3].

На сегодняшний день в качестве ЛСК допускается использовать только одинарное остекление, имеющее параметры не менее указанных в [4]. Любые иные технические решения, планируемые к использованию в качестве ЛСК, должны подтвердить возможность их применения испытаниями по [5].

К таким конструкциям относятся и двойное остекление, необходимость испытаний которого в случае соблюдения минимально необходимых параметров, аналогичных для одинарного остекления, не устанавливалась до 01 сентября 2018 года. Причиной исключения двойного остекления из перечня ЛСК стало неоднозначное толкование Министерством архитектуры и строительства Республики Беларусь термина «переплет с двойным остеклением».

Основным проблемным моментом явилась возможность размещения в одном переплете двух листов стекла без нормирования расстояния между стеклянными пластинами. В этом случае при приложении давления со стороны помещения возможно возникновение «пятна контакта» между пластинами, что может привести к повышению величины избыточного давления вскрытия ЛСК и, как следствие, превышению максимально безопасного для человека избыточного давления в помещении.

Примером такой конструкции может служить оконный блок со светопрозрачным заполнением в виде стеклопакета, у которого отсутствует:

- герметизация по контуру с помощью отверждающегося герметика;

- крепление стеклянных пластин к дистанционной рамке с помощью нетвердеющего герметика.

Для определения теоретической возможности возникновения «пятна контакта» необходимо определить возможную величину прогиба стеклянных пластин при приложении избыточного давления, возникающего при дефлаграционном сгорании горючей смеси в защищаемом объеме.

Моделирование прогиба стеклянной пластины, размещаемой со стороны защищаемого помещения

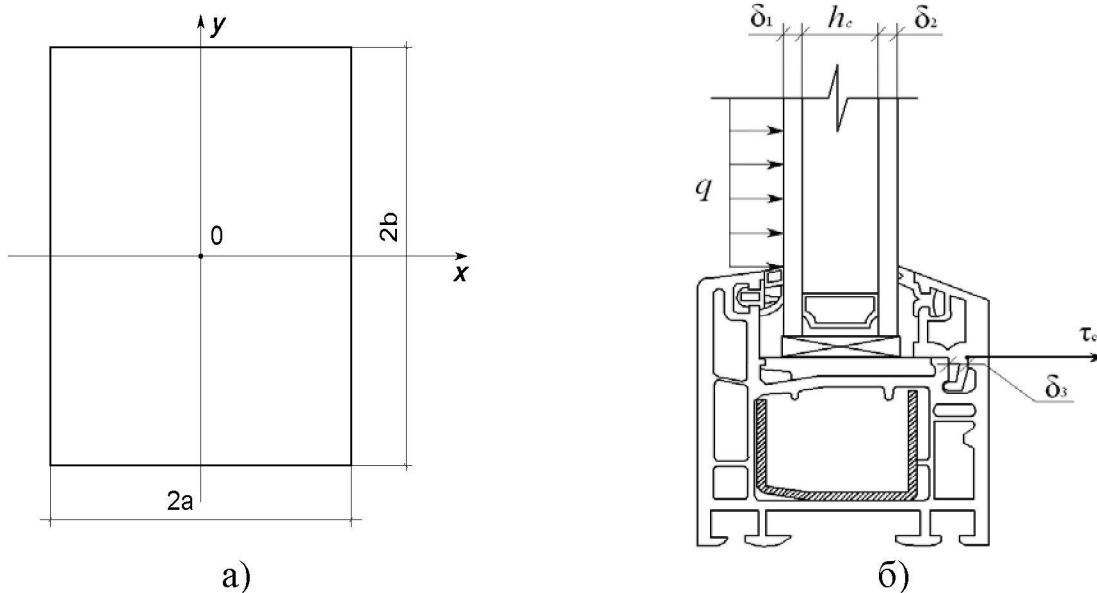
ЛСК представляет собой окно, изготовленное из алюминиевого профиля (сплав AW-6063: AlMg0,7Si 6063, состояние T6), остекленное двумя стеклами толщиной 4 мм каждое, с дистанционной рамкой между ними 15,5 мм размером

1244×1244 мм. Рама изготовлена из четырех (двух горизонтальных, длиной 1244 мм и двух вертикальных длиной 1244 мм) обрамляющих алюминиевых профилей шириной 58 мм и толщиной 48 мм. Профили соединены между собой при помощи угловых закладных. В качестве заполнения используются два стекла толщиной 4 мм каждое, с дистанционной рамкой между ними толщиной 15,5 мм. Размер заполнения 1148×1148×24 мм. Заполнение закреплено в раму алюминиевым штапиком. Особенностью испытываемого окна является отсутствие крепления стеклянных пластин к дистанционной рамке.

Модуль Юнга для стекла равен 70 000 МПа [6], коэффициент Пуассона – 0,23 [6], величина прикладываемой равномерно распределенной нагрузки – 0,0069 Н·мм⁻². Величина прогиба стеклянной пластины определяется в ее центре.

Рассматриваемое светопрозрачное заполнение состоит из стеклянных пластин длиной $2b$, шириной $2a$ и толщиной δ_1 и δ_2 , размещенных на расстоянии h_c , удерживаемые штапиком крепления с шириной продольного уса δ_3 .

Геометрическая модель стеклянной пластины и модель воздействия избыточного давления взрыва на светопрозрачное заполнение приведены на рисунке 1.



а – стеклянная пластина; б – модель воздействия избыточного давления на светопрозрачное заполнение

Рисунок 1. – Геометрическая модель стеклянной пластины и модель воздействия избыточного давления взрыва на оконный блок

При возникновении дефлаграционного сгорания в замкнутом объеме происходит прогиб внутренней пластины под воздействием квазистатической взрывной нагрузки q . Приложение взрывной нагрузки q и возникновение прогиба приводят

к появлению напряжений на поверхности пластины, которые могут разрушить ее.

Для описания поведения стеклянных пластин под воздействием квазистатической взрывной нагрузки используется уравнение [7]:

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

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 под нагрузкой может быть в несколько раз больше их толщины, что подтверждается требованиями DIN 18516 [8, 9], в соответствии с которым максимальный допустимый прогиб при изгибе рекомендуется принимать не более 1 % длины большей стороны пластины. Так как величина прогиба стеклянной пластины превысит ее толщину, следовательно, в данном случае нельзя пренебрегать напряжениями, возникающими в срединной поверхности пластины.

При разработке математической модели поведения светопрозрачного заполнения при воздействии квазистатической взрывной нагрузки приняты следующие предположения [10, 11]:

– светопрозрачное заполнение рассматривалось как пластина, жестко заделанная по контуру;

– в связи с тем, что возможен прогиб внутренней стеклянной пластины на величину большую, чем ее толщина, жесткость пластины принималась равной нулю [12] и пластина рассматривалась как мембрана.

Для решения уравнения (1) с учетом принятых допущений было использовано начало возможных перемещений, примененное к полному значению потенциальной энергии мембраны, при этом прогиб w определен как четная функция относительно центра мембраны, для него было принято выражение (2), которое обращается в нуль на контуре [7]:

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

В результате решения уравнения, полученного при применении к выражению полной энергии начала

возможных перемещений [11], численное значение коэффициента C определяется по формуле (3):

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

где $j_{gp} = -18a^2b^2 - 3a^4 + 3\mu_1b^4 - 3b^4 + 3\mu_1a^4 + 2\mu_1a^2b^2$, мм⁴;
 $k_{gp} = -3b^4 - 3a^4 - 18a^2b^2 + 3\mu_1b^4 + 2\mu_1a^2b^2 + 9\mu_1a^4 - 2\mu_1^2a^2b^2 + 5\mu_1a^3b +$
 $+ \mu_1ab^3 - \mu_1^2a^3b - \mu_1^2ab^3$, мм⁴;
 $m_{gp} = -3b^4 - 3a^4 - 18a^2b^2 + 3\mu_1a^4 + 2\mu_1a^2b^2 + 9\mu_1b^4 - 2\mu_1^2a^2b^2 +$
 $+ 5\mu_1ab^3 + \mu_1a^3b - \mu_1^2a^3b - \mu_1^2ab^3$, мм⁴;
 $r_{gp} = 9a^4 + 9b^4 + 2a^2b^2$, мм³
 $s_{gp} = 3b^3 + a^2b - \mu_1ab^2 - \mu_1a^2b$, мм³;
 $t_{gp} = 3a^3 + ab^2 - \mu_1ab^2 - \mu_1a^2b$, мм³;
 E – модуль Юнга стекла, Н/мм²;
 μ_1 – коэффициент Пуассона для стекла.

Для рассматриваемого свето-прозрачного заполнения параметры принимают следующие значения:
 $j_{gp} = -2,41 \times 10^{12}$ мм⁴, $k_{gp} = -2,13 \times 10^{12}$ мм⁴,
 $m_{gp} = -2,13 \times 10^{12}$ мм⁴, $r_{gp} = 2,17 \times 10^{12}$ мм³,
 $s_{gp} = 6,69 \times 10^8$ мм³, $t_{gp} = 6,69 \times 10^8$ мм³,
 $C = 11,63$ мм.

Моделирование поведения рассматриваемой ЛСК в ANSYS

Оценка возможности возникновения «пятна контакта» проводилась с использованием программного продукта ANSYS Workbench, при этом рассматривался одновременный прогиб стеклянных пластин.

До начала процесса расчета была поэлементно построена геометрическая модель рассматриваемого стеклопакета.

После построения геометрической модели при помощи встроенных в программное обеспечение библиотек были заданы свойства стекла и алюминиевого сплава AW-6063, из которого изготовлена рама стеклопакета, а также режим изменения давления в защищаемом помещении до момента разрушения светопрозрачного заполнения (рисунки 2, 3).

Properties of Outline Row 4: Glass					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/> Material Field Variables	Table			
3	<input checked="" type="checkbox"/> Density	2200	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
5	Derive from	Young's...			
6	Young's Modulus	7E+10	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Poisson's Ratio	0.23			<input type="checkbox"/>
8	Bulk Modulus	4.321E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
9	Shear Modulus	2.8455E+10	Pa		<input type="checkbox"/>

Рисунок 2. – Свойства стекла, применяемые в расчете

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/> Material Field Variables	Table			
3	<input checked="" type="checkbox"/> Density	2700	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
5	Derive from	Young's...			
6	Young's Modulus	7.1E+10	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Poisson's Ratio	0.33			<input type="checkbox"/>
8	Bulk Modulus	6.9608E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
9	Shear Modulus	2.6692E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
10	<input checked="" type="checkbox"/> Bilinear Kinematic Hardening			<input type="checkbox"/>	
11	Yield Strength	2.35E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Tangent Modulus	1E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

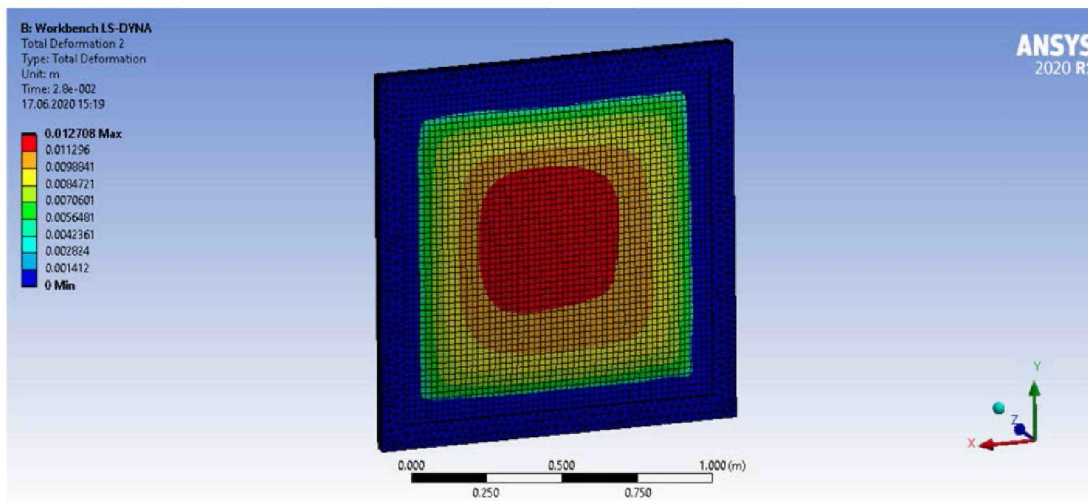
Рисунок 3. – Свойства алюминиевого сплава AW-6063, применяемые в расчете

Tabular Data		
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Stress Probe 2 (Maximum Principal) [Pa]
1	0.	0.
2	2.8e-002	3.6613e+007

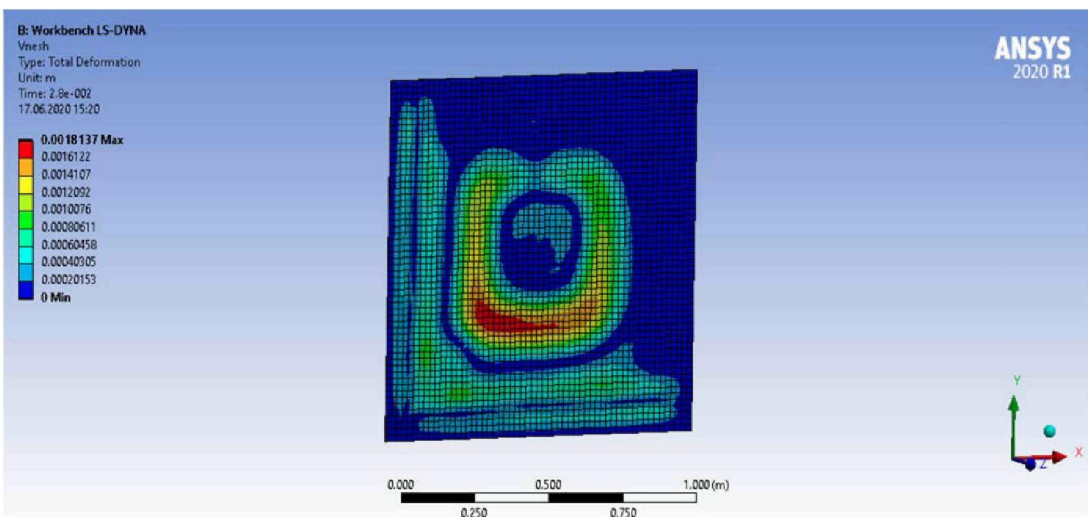
Рисунок 4. – Зависимость избыточного давления от времени

Далее была смоделирована сетка, делящая тела на единицы объема при моделировании прогиба, заданы условия моделирования и проведен расчет прогиба как внутренней (раз-

мещаемой со стороны защищаемого помещения), так и внешней стеклянной пластины. Результаты моделирования приведены на рисунках 5а, б.



а – вид внутренней стеклянной пластины (со стороны приложения нагрузки) с обозначением стрелы прогиба стеклопакета



б – вид внешней стеклянной пластины (со стороны приложения нагрузки) с обозначение стрелы прогиба стеклопакета

Рисунок 5. – Общий вид расчетных конечно-элементных моделей легкобросываемой конструкции

Выводы

1. Для оконного блока со светопрозрачным заполнением в виде стеклопакета, у которого отсутствует герметизация по контуру, с помощью отверждающегося герметика и крепления стеклянных пластин к дистанционной рамке с помощью нетвердеющего герметика проведено моделирование поведения при при-

ложении квазистатической нагрузки с использованием метода начала возможных перемещений, а также в программном продукте ANSYS Workbench.

2. Величина прогиба внутренней (размещаемой со стороны помещения) стеклянной пластины составила 11,63 м (метод начала воз-

можных перемещений) и 12,71 мм (ANSYS Workbench) соответственно.

3. В результате моделирования установлено, что при ширине дистанционной рамки 15,5 мм возникновение «пятна контакта» стеклянных пластин не наблюдается, однако при уменьшении ее ширины возможно наблюдение данного явления, что требует проведения дополнительных экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пассивная противопожарная защита. Термины и определения: СТБ 11.0.03-95 – Введ. 16.03.1995.- Минск: НПРУП «Бел. гос. ин-тут стандартиз. и сертиф.», 1995.– 73 с. – Система стандартов пожарной безопасности.

2. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования: СТБ 11.05.03-2010. – Введ. 01.01.2011. – Минск : Госстандарт, 2010.– 71 с. – Система стандартов пожарной безопасности.

3. Конструкции легкобрасываемые. Правила расчета: ТКП 45-2.02-38-2006.– Введ. 01.01.2007. – Минск : Мин-во архитект. и строит. Респ. Беларусь, 2006. – 27 с.

4. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Электронный ресурс] : СН 2.02.05-2020 // СтройДОК Online / РУП «Стройтехнорм». – Режим доступа: <https://normy.by/ips.php>. – Дата доступа: 03.09.2021.

5. Конструкции легкобрасываемые. Метод определения избыточного давления вскрытия [Электронный ресурс] : Государственный стандарт Республики Беларусь,

СТБ 1762–2007. – Введ. 01.01.2008 // Стройдок Online. – Минск, 2020.

6. Стекло листовое бесцветное. Технические условия [Электронный ресурс] : Государственный стандарт Республики Беларусь, ГОСТ 111–2014. – Введ. 01.10.2016 // Стройдок Online. – Минск, 2020.

7. Авдонин, А.С. Прикладные методы расчета оболочек и тонкостенных конструкций / А.С. Авдонин. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1969. – 403 с.

8. Прочностные свойства стекла. Несущая способность. Расчет на прочность. Допустимые напряжения при изгибе [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.oknograd.ru/download/papers/boroskina-prochnost-stekla-v-oknah-pvh.doc>. – Дата доступа: 09.04.2010.

9. 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.

10. Миканович, А. С. Использование стеклопакетов для взрывозащиты производственных и складских помещений [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03 : защищена 15.03.2013 / Миканович Андрей Станиславович. – Минск, 2013. – 132 с. – Библиогр. : С. 98–112.

11. Миканович, А. С. Математическое моделирование поведения стеклянной пластины и узла крепления стеклопакета к оконной раме при воздействии избыточного давления взрыва [Текст] / А. С. Миканович // Вестн. Команд.-инженер.

ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2011. – № 2 (14). – С. 105–119.

12. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Изд-во «Наука», 1966. – 636 с.

REFERENCES

1. Passivnaya protivopozharnaya zashchita. Terminy i opredeleniya: STB 11.0.03-95 – Vved. 16.03.1995.- Minsk: NPRUP «Bel. gos. in-tut standartiz. i sertif.», 1995.– 73 s. – Sistema standartov pozharnej bezopasnosti.

2. Pozharnaya bezopasnost' tekhnologicheskikh processov. Metody ocenki i analiza pozharnej opasnosti. Obshchie trebovaniya: STB 11.05.03-2010. – Vved. 01.01.2011. – Minsk : Gosstandart, 2010.– 71 s. – Sistema standartov pozharnej bezopasnosti.

3. Konstrukcii legkosbrasyvayemye. Pravila rascheta: ТКР 45-2.02-38-2006.– Vved. 01.01.2007. – Minsk : Min-vo arhitekt. i stroit. Resp. Belarus', 2006. – 27 s.

4. Pozharnaya bezopasnost' zdaniy i sooruzhenij [Elektronnyj resurs] : SN 2.02.05-2020 // StrojDOK Online / RUP «Strojtekhnorm». – Rezhim dostupa: <https://normy.by/ips.php>. – Data dostupa: 03.09.2021.

5. Konstrukcii legkosbrasyvayemye. Metod opredeleniya izbytochnogo davleniya vskrytiya [Elektronnyj resurs] : Gosudarstvennyj standart Respubliki Belarus', STB 1762–2007. – Vved. 01.01.2008 // StrojDok Online. – Minsk, 2020.

6. Steklo listovoe bescvetnoe. Tekhnicheskie usloviya [Elektronnyj resurs] : Gosudarstvennyj standart Respubliki Belarus', GOST 111–2014. – Vved. 01.10.2016 // StrojDok Online. – Minsk, 2020.

7. Avdonin, A.S. Prikladnye metody rascheta obolochek i tonkostennykh konstrukcij / A.S.Avdonin. – M.: Izd-vo «Mashinostroenie», 1969. – 403 s.

8. Prochnostnye svojstva stekla. Nesushchaya sposobnost'. Raschet na prochnost'. Dopustimye napryazheniya pri izgibe [Elektronnyj resurs]. – 2010. – Rezhim dostupa: <http://www.oknograd.ru/download/papers/boriskina-prochnost-stekla-v-oknah-pvh.doc>. – Data dostupa: 09.04.2010.

9. Boriskina, I.V. Okna dlya individual'nogo stroitel'stva. Tekhnicheskoe rukovodstvo po proek-tirovaniyu sovremennykh okon iz PVH dlya ob'ektov kottedzhnogo stroitel'stva i zdaniy maloetazhnoj zastrojki / I.V. Boriskina, A.N. SHCHurov, A.A. Plotnikov. – M., 2010. – 320 s.

10. Mikanovich, A. S. Ispol'zovanie steklopaketov dlya vzryvozaschity proizvodstvennykh i skladskih pomeshchenij [Tekst] : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.26.03 : zashchishchena 15.03.2013 / Mikanovich Andrej Stanislavovich. – Minsk, 2013. – 132 s. – Bibliogr. : s. 98–112.

11. Mikanovich, A. S. Matematicheskoe modelirovanie povedeniya steklyannoj plastiny i uzla kreple-niya steklopaketa k okonnoj rame pri vozdeystvii izbytochnogo davleniya vzryva [Tekst] / A. S. Mikanovich // Nauchn. zhurn. «Vestn. Komand.-inzhen. in-ta MCHS Resp. Belarus'». – 2011. – №2 (14). – S. 105–119.

12. Timoshenko, S.P. Plastinki i оболочки / S.P. Timoshenko, S. Vojnovskij-Kriger. – M.: Izd-vo «Наука», 1966. – 636 с.

