



DOI: 10.17512/bozpe.2019.1.16

Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym  
Construction of optimized energy potential

ISSN 2299-8535 e-ISSN 2544-963X



## Rozkład obciążeń środowiskowych w jednokomorowych szymbach zespolonych usytuowanych niepionowo

Zbigniew Respondek<sup>1</sup> (*orcid id: 0000-0003-0204-5061*)

<sup>1</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

**Streszczenie:** Szymbach zespolone charakteryzują się specyficznym sposobem przenoszenia obciążeń klimatycznych. Gaz w szczelnie zamkniętych komorach między szymbach składowymi zmienia swoje parametry przy zmianie warunków pogodowych, co wpływa na wypadkowe obciążenie każdej z szymbach składowych zestawu. W modelach obliczeniowych dotyczących opisywanego zjawiska przyjmuje się najczęściej pionowe usytuowanie szymbach i pomija się obciążenie ciężarem własnym szkła. Celem przedstawionych w artykule badań jest analiza wpływu poziomego lub ukośnego usytuowania na wielkości statyczne w jednokomorowych szymbach zespolonych obciążonych klimatycznie. Uwzględnienie wpływu ciężaru własnego wymagało odpowiedniej modyfikacji własnego modelu obliczeniowego. Na podstawie przedstawionych przykładów sformułowano wnioski na temat obciążania wypadkowego, ugięcia i naprężenia w zestawach szymbach o różnej konstrukcji obciążonych zmianami ciśnienia atmosferycznego i temperatury oraz wiatrem.

**Słowa kluczowe:** szkło w budownictwie, szymbach zespolone, obciążenia klimatyczne budynków

**Użytkowanie treści artykułu tylko w oparciu o licencję Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0**

**Proszę cytować ten artykuł w następujący sposób:**

Z. Respondek, Rozkład obciążeń środowiskowych w jednokomorowych szymbach zespolonych usytuowanych niepionowo, Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, vol. 8, 1, 2019, 147-154, DOI: 10.17512/bozpe.2019.1.16

## Wprowadzenie

Stosowane powszechnie w oknach i szklanych fasadach szymbach zespolone składają się z dwóch lub więcej tafli szkła, a przestrzeń między nimi tworzy szczelną komorę wypełnioną gazem. Taka konstrukcja generuje specyficzny sposób przenoszenia obciążeń środowiskowych. Na przykład spadek zewnętrznego ciśnienia atmosferycznego lub wzrost temperatury gazu w komorze prowadzi do powstania w komorze nadciśnienia, co skutkuje wtórnym obciążeniem szymbach składowych

i wypukłą formą ugięcia zestawu. Odwrotne działania skutkują natomiast podciśnieniem i wklęsłą formą ugięcia. Szczelność wypełnionych gazem komór generuje więc pewne niekorzystne obciążenia, które nie występują w przypadku możliwości wyrównania ciśnienia między komorą a otoczeniem. Inaczej jest w przypadku obciążeń działających asymetrycznie, np. obciążenia wiatrem. Zmiany parametrów gazu w komorze prowadzą do częściowego odciążenia szyby obciążonej bezpośrednio i wtórnego obciążenia pozostałych szyb - w konsekwencji zewnętrzne obciążenie powierzchniowe rozkłada się na wszystkie szyby zestawu, co jest korzystne, gdyż w zestawach niehermetycznych w zasadzie całe obciążenie zewnętrzne przejmują szyby obciążone bezpośrednio.

Analityczne i numeryczne sposoby określania wielkości statycznych w obciążonych klimatycznie szybach zespolonych są znane z literatury, m.in. (Feldmeier, 2006; Respondek, 2017; Solvason, 1974; Stratiy, 2017; Velchev i Ivanov, 2014). Wykonywano również badania eksperymentalne ugięcia szyb składowych w obciążonych klimatycznie zestawach w warunkach rzeczywistych (Hart i in., 2012) i laboratoryjnych (Penkova i in., 2017). W powyższych pracach nie analizowano szczegółowo wpływu ciężaru własnego tafli szklanych na wielkości statyczne w zestawach usytuowanych niepionowo. Obecnie szklane przekrycia pomieszczeń wykonuje się coraz częściej - również z wykorzystaniem szyb zespolonych.

Celem przedstawionych w artykule badań jest analiza wpływu poziomego lub ukośnego usytuowania szyb zespolonych na wielkości statyczne w tych szybach w warunkach eksploatacyjnych. W niniejszym artykule ograniczono się do analizy szyb jednokomorowych. Przypadek szyb o dowolnej liczbie komór będzie przedmiotem kolejnego opracowania. Przedstawiono przykłady ilustrujące rozkład obciążeń w usytuowanych niepionowo szybach zespolonych o różnej konstrukcji.

## 1. Obliczenia obciążenia wypadkowego w IGU - założenia

W zasadzie we wszystkich cytowanych wcześniej opracowaniach obliczenia wielkości statycznych w obciążonych szybach zespolonych wykonuje się według podobnych założeń. Przede wszystkim przyjmuje się, że parametry gazu zamkniętego w szczelnej komorze: ciśnienie  $p$ , kPa, temperatura  $T$ , K, i objętość  $v$ , m<sup>3</sup>, spełniają prawo gazowe

$$\frac{p \cdot v}{T} = \text{const} \quad (1)$$

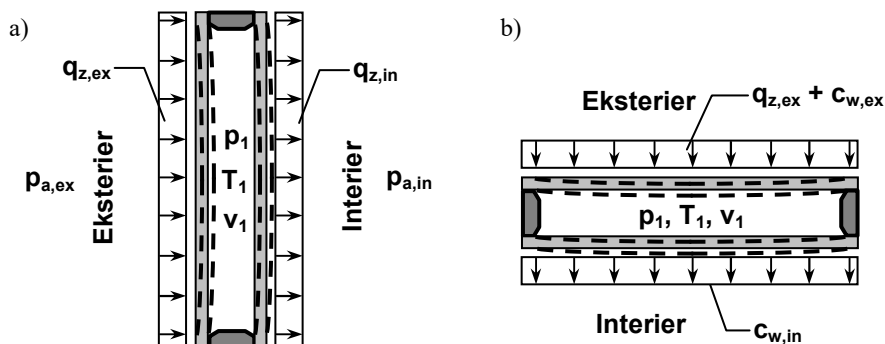
Szyby składowe są zespalane w zestaw w pozycji pionowej. W trakcie łączenia w wytwórni komory są napełniane gazem (najczęściej argonem). Przyjmuje się, że gaz w komorach posiada pewne parametry początkowe ciśnienia  $p_0$ , kPa, i temperatury  $T_0$ , K, przy których szyby składowe są płaskie i równoległe do siebie, to znaczy komora posiada objętość początkową  $v_0$ , m<sup>3</sup>, wynikającą z jej wymiarów nominalnych. Parametry początkowe gazu są nadane dla konkretnego zestawu w procesie technologicznym jego produkcji, w ogólnych analizach zakłada się natomiast najczęściej uśrednione lub graniczne wartości  $p_0$  i  $T_0$ .

W trakcie eksploatacji na zestaw działają obciążenia klimatyczne (zmiany ciśnienia zewnętrznego, temperatury, wiatr), które powodują ugięcie szyb zestawu, przez co komora zmienia swoją objętość. Zmiana objętości komory wywołuje zmianę ciśnienia gazu w jej wnętrzu, co skutkuje częściową kompensacją skutków obciążeń klimatycznych. Wypadkowe obciążenia działające na poszczególne szyby składowe zestawu są więc efektem osiągnięcia stanu chwilowej równowagi między obciążeniami zewnętrznymi a parametrami gazu w komorze. Sposób określenia tych obciążeń wypadkowych w sposób bardziej szczegółowy opisano w (Respondek, 2017). Podano sposób obliczenia eksploatacyjnego ciśnienia gazu w komorach obciążonych klimatycznie zestawów szyb. W przypadku szyb jednokomorowych można podać wzór analityczny. W przypadku szyb wielokomorowych należy numerycznie rozwiązać układ równań nieliniowych.

Znając ciśnienie gazu w komorach obciążonych zestawów, można określić wypadkowe obciążenie każdej z szyb składowych. Następnie można określić wielkości statyczne w szybach (ugięcie, naprężenie), bazując na rozwiązaniach znanych z teorii płyt - przyjmuje się najczęściej schemat płyty swobodnie podpartej i przypadek małych ugięć, tzn. nie większych niż grubość szyby (Klindt i Klein, 1997).

## 2. Obciążenie wypadkowe szyb zespolonych usytuowanych nie pionowo

Uwzględnienie ciężaru własnego szkła w obliczeniach obciążenia wypadkowego  $q$ , kPa, szyb w zestawach jednokomorowych polega na modyfikacji wzorów podanych w (Respondek, 2017). Schemat przyjętych oznaczeń przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat oznaczeń parametrów dla szyb usytuowanych:  
a) pionowo, b) poziomo (opracowanie własne)

Oznaczenia w razie potrzeby uzupełniono indeksami: ex - od strony powietrza zewnętrznego, in - od strony pomieszczenia. Przyjęto konwencję, że występujące we wzorach lub wynikach wielkości są dodatnie, jeżeli mają zwrot w stronę pomieszczenia (według rys. 1 z lewej do prawej lub z góry na dół). Wartość obciążenia ciężarem własnym  $c_w$ , kN/m<sup>2</sup>, każdej z szyb przyjęto według wzoru

$$c_w = \gamma \cdot d \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

gdzie:

$\gamma$  - ciężar właściwy szkła, w przybliżeniu  $25 \text{ kN/m}^3$ ;

$d$  - grubość szyby składowej, m;

$\alpha$  - kąt nachylenia zestawu do poziomu.

Eksploatacyjne ciśnienie gazu  $p_1$ , kPa, w komorze obciążonego zestawu przy znanych parametrach początkowych  $p_0$ ,  $T_0$ ,  $v_0$  można obliczyć ze wzoru

$$p_1 = \frac{A}{2 \cdot B} + \sqrt{\left(\frac{A}{2 \cdot B}\right)^2 + \frac{p_0 \cdot v_0 \cdot T_1}{B \cdot T_0}} \quad (3)$$

przy czym  $A = c_{\text{ex}} \cdot \alpha_{\text{v,ex}} + c_{\text{in}} \cdot \alpha_{\text{v,in}} - v_0$ ,  $B = \alpha_{\text{v,ex}} + \alpha_{\text{v,in}}$  (4)

oraz  $c_{\text{ex}} = p_{\text{a,ex}} + q_{\text{z,ex}} + c_{\text{w,ex}}$   $c_{\text{in}} = p_{\text{a,in}} - q_{\text{z,in}} - c_{\text{w,in}}$  (5)

gdzie:

$T_1$  - eksploatacyjna temperatura gazu w komorze, K;

$p_{\text{a,ex}}, p_{\text{a,in}}$  - eksploatacyjne ciśnienie atmosferyczne, kPa; na ogół przyjmuje się jednakowe ciśnienie po obu stronach przegrody  $p_{\text{a}}$ ;

$q_{\text{z,ex}}, q_{\text{z,in}}$  - obciążenie zewnętrzne,  $\text{kN/m}^2$ ; przede wszystkim obciążenie wiatrem szyby (ex); dla szyb o małym nachyleniu w zasadzie zawsze  $q_{\text{z,in}} = 0$ ;

$\alpha_{\text{v,ex}}, \alpha_{\text{v,in}}$  - współczynniki opisujące podatność danej szyby na ugięcie,  $\text{m}^5/\text{kN}$ .

Współczynniki  $\alpha_{\text{v}}$  opisują zmianę objętości komory przy jednostkowym obciążeniu szyby składowej, można je określić ze wzoru

$$\alpha_{\text{v}} = \alpha'_{\text{v}} \frac{12 \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot d^3} \cdot a^6 \quad (6)$$

gdzie:

$\alpha'_{\text{v}}$  - współczynnik bezwymiarowy (tab. 1);

$a$  - szerokość (krótszy wymiar) szyby składowej, m;

$d$  - grubość szyby składowej, m;

$E$  - moduł Younga, dla szkła przyjmuje się najczęściej  $70 \cdot 10^6 \text{ kPa}$ ;

$\mu$  - liczba Poissona, dla szkła przyjmuje się  $0,2-0,23$ .

**Tabela 1.** Współczynniki  $\alpha'_{\text{v}}$  obliczone na podstawie ogólnej teorii płyt (Timoshenko i Woinowski-Krieger, 1959)

$b/a^{1)}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$\alpha'_{\text{v}}$	0,001703	0,002246	0,002848	0,003499	0,004189	0,004912
$b/a^{1)}$	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	3,0
$\alpha'_{\text{v}}$	0,005659	0,006427	0,00721	0,008004	0,008808	0,017055

<sup>1)</sup>  $b/a$  - stosunek długości szyby  $b$  do jej szerokości  $a$

Wynikowe obciążenia wypadkowe  $q$  dla obu szyb zestawu wynoszą

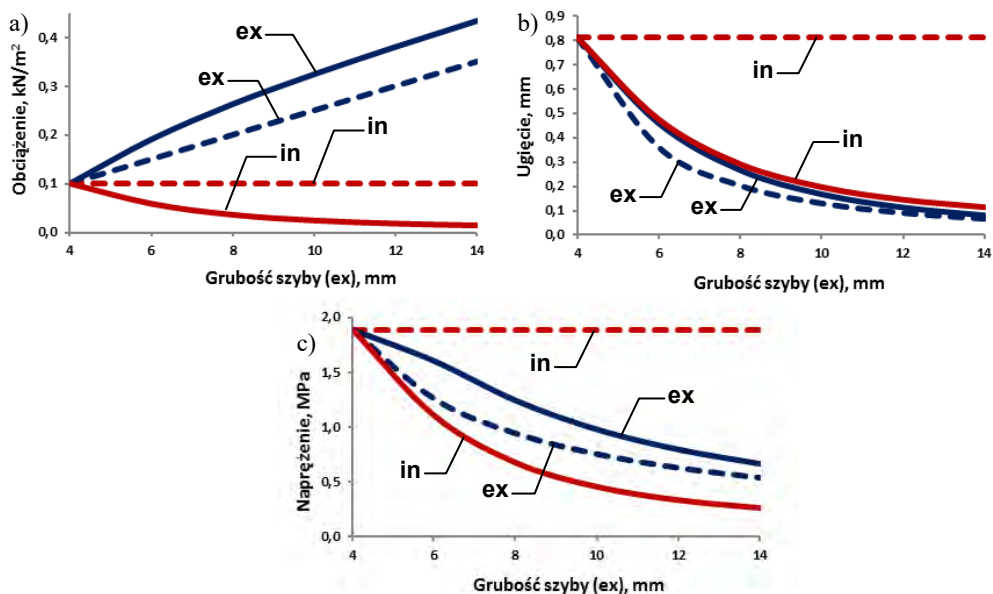
$$q_{\text{ex}} = c_{\text{ex}} - p_1, \quad q_{\text{in}} = p_1 - c_{\text{in}} \quad (7)$$

### 3. Przykładowe obliczenia

Przedstawiona metodyka pozwala na analizę wielu przykładów szyb zespolonych o różnej konstrukcji obciążonych w różny sposób. Przytoczone przykłady odnoszą się do przyjętego zestawu bazowego o parametrach: wymiary  $80 \times 120$  cm, grubość komory  $s = 16$  mm, grubość szyby wewnętrznej  $d_{\text{in}} = 4$  mm, zmienna grubość szyby zewnętrznej, cechy materiałowe  $E = 70$  GPa,  $\mu = 0,2$ ; parametry początkowe  $p_0 = 100$  kPa,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ . W obliczeniach obciążenia wypadkowego  $q$  i ugięcia  $w$  w środku szyby uwzględniono znaki według przyjętej konwencji, dla obliczonego maksymalnego naprężenia  $\sigma_{x,\text{max}}$ , MPa, podano wartość bezwzględną.

#### 3.1. Obciążenie ciężarem własnym

Wpływ szczelności komory na rozkład wielkości statycznych w usytuowanej poziomo szybie zespolonej zilustrowano, rozpatrując zestaw szczelny i zdehermetyzowany (natychmiastowe wyrównanie ciśnienia z otoczeniem, szyby pracują niezależnie). Szyby obciążone są tylko ciężarem własnym. Założono możliwość pogrubienia szyby zewnętrznej (ex). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 2.



**Rys. 2.** Wielkości statyczne w zestawach zdehermetyzowanych (linia przerywana) i szczelnych (linia ciągła) obciążonych ciężarem własnym szkła: a) obciążenie wypadkowe, b) ugięcie, c) maksymalne naprężenie (opracowanie własne)

W przypadku jednakowej sztywności obu szyb uginają się one jednakowo, objętość komory się nie zmienia i wielkości statyczne w zestawie szczelnym nie różnią się od wielkości w zestawie zdehermetyzowanym. Jeżeli górna szyba składowa jest grubsza (ex), ma mniejszą podatność na ugięcia niż szyba dolna - w konsekwencji objętość komory rośnie, a ciśnienie w niej maleje. Powstałe korzystne podciśnienie kompensuje częściowo obciążenie ciężarem własnym dolnej szyby.

### 3.2. Obciążenie zmianami ciśnienia i temperatury

Obciążenia zmianą ciśnienia atmosferycznego i zmianą temperatury gazu w komorze wywołują podobne skutki. Można wykazać, że np. wzrost temperatury gazu w komorze o 1 K jest adekwatny do spadku ciśnienia zewnętrznego o 0,341 kPa. Jak pokazano w artykule (Respondek, 2018), w przypadku jednakowych sztywności szyb składowych wielkości statyczne w zestawach rozkładają się symetrycznie. W przypadku zróżnicowania grubości szyb dochodzi do niekorzystnego zjawiska: zmniejszona podatność pogrubionej szyby na ugięcie utrudnia kompensację wpływów klimatycznych zmianami ciśnienia gazu w komorze - obciążenia wypadkowe na obie szyby rosną (co do wartości bezwzględnej). W konsekwencji np. ekstremalne ugięcie i naprężenie w zestawie 8-16-4 jest większe niż w zestawie 4-16-4. W tabeli 2 analizowano zachowanie się zestawów usytuowanych pionowo i poziomo (z uwzględnieniem ciężaru własnego) Przyjęto dwa warianty obciążenia: wzrost ciśnienia atmosferycznego o  $\Delta p_a = p_a - p_0 = 3$  kPa oraz spadek ciśnienia  $\Delta p_a = -3$  kPa.

**Tabela 2.** Wielkości statyczne w zestawach z szybami o jednakowej (4-16-4) i różnej (8-16-4) grubości szyb składowych (opracowanie własne)

$\Delta p_a$ kPa	Obciążenie wypadkowe kN/m <sup>2</sup>				Ugięcie mm				Naprężenie MPa			
	pionowo		poziomo		pionowo		poziomo		pionowo		poziomo	
	ex	in	ex	in	ex	in	ex	in	ex	in	ex	in
Zestaw 4-16-4												
-3	-0,070	0,070	0,030	0,170	-0,57	<b>0,57</b>	0,24	<b>1,38</b>	1,32	<b>1,32</b>	0,56	<b>3,20</b>
3	0,066	-0,066	0,166	0,034	<b>0,54</b>	-0,54	<b>1,35</b>	0,28	1,24	<b>1,24</b>	<b>3,13</b>	0,64
Zestaw 8-16-4												
-3	-0,122	0,122	0,142	0,158	-0,12	<b>0,99</b>	0,14	<b>1,29</b>	0,57	<b>2,30</b>	0,67	<b>2,98</b>
3	0,116	-0,116	0,380	-0,080	0,12	<b>-0,94</b>	0,39	<b>-0,65</b>	0,54	<b>2,18</b>	<b>1,79</b>	1,50

Z tabeli 2 wynika, że w przypadku jednakowej sztywności szyb składowych poziome usytuowanie negatywnie wpływa na ekstremalne ugięcie i naprężenie w szybach zespolonych. Wpływy klimatyczne działają symetrycznie, dlatego zawsze sumują się z ciężarem własnym jednej z szyb. Dla przykładowych (tab. 2) danych wielkości statyczne wzrosły ok. 2,5 razy.

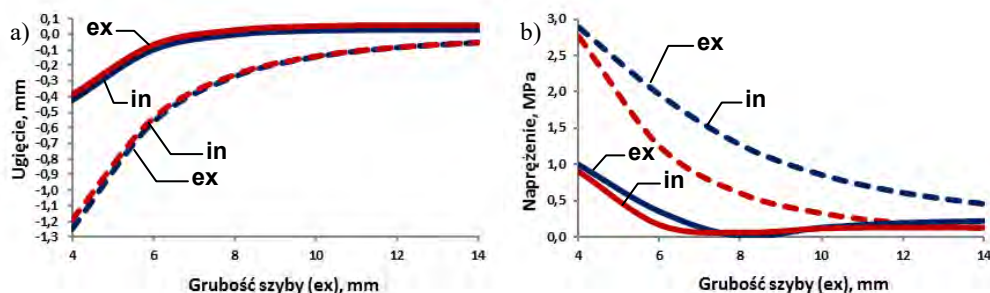
W przypadku pogrubienia szyby górnej szyba ta jest sztywniejsza i mniej podatna na ugięcia, dlatego niekorzystne jest obciążenie spadkiem ciśnienia zewnętrznego

(lub wzrostem temperatury gazu) - ugięcie i naprężenie wzrastają o ok. 30%. Przy wzroście ciśnienia zewnętrznego mniej sztywna szyba dolna jest odciążana, przez co wielkości statyczne w zestawie poziomym są mniejsze niż w usytuowanym pionowo.

### 3.3. Obciążenia powierzchniowe

W przypadku przykryć o małym nachyleniu mamy do czynienia przede wszystkim ze ssaniem wiatru. Ze względu na przeciwne zwroty ssanie wiatru i ciężar własny mogą się wzajemnie częściowo kompensować, przez co w szybach poziomych występują mniejsze ugięcia i naprężenia niż w pionowych. W przypadku takich obciążeń, jak parcie wiatru na szyby usytuowane ukośnie lub obciążenie śniegiem, składowa ciężaru własnego sumuje się z obciążeniami zewnętrznymi, co jest niekorzystne.

Na rysunku 3 przedstawiono obliczenia ugięcia i naprężenia dla zestawów obciążonych ssaniem wiatru o wartości  $q_{z,ex} = -0,3 \text{ kN/m}^2$ , w zależności od grubości szyby górnej. Można zauważyć, że duże korzyści daje pogrubienie szyby (ex) do ok. 8 mm, dalsze zwiększenie jej grubości nie ma większego wpływu na wielkości statyczne. Charakterystyczny jest również sposób rozkładu obciążenia zewnętrznego - sztywniejsza szyba przejmuje większą część obciążenia tak, że ugięcia w obu szybach są prawie równe, a w przypadku szyb poziomych prawie wyrównane są również naprężenia.



Rys. 3. Wielkości statyczne w zestawach usytuowanych pionowo (linia przerywana) i poziomo (linia ciągła) obciążonych ssaniem wiatru  $q_{z,ex} = -0,3 \text{ kN/m}^2$  (opracowanie własne)

## Wnioski

W artykule analizowano niektóre aspekty związane z wpływem obciążenia ciężarem własnym szyb zespolonych usytuowanych poziomo lub ukośnie.

Wielkości statyczne w szybach zespolonych kształtuje przede wszystkim szczelna wypełniona gazem komora, która reaguje na wpływy zewnętrzne zmianą ciśnienia tego gazu. Jest to widoczne w przypadku obciążonych tylko ciężarem własnym zestawów o zróżnicowanej grubości szyb. W komorze powstaje korzystne podciśnienie, dzięki któremu dolna, mniej sztywna szyba zostaje częściowo odciążona.

Obciążenie zmianami ciśnienia atmosferycznego i temperatury jest szczególnie niekorzystne dla poziomych zestawów o jednakowych sztywnościach szyb składo-

wych. Ugięcia i naprężenia w tak usytuowanych zestawach wydatnie wzrastają. Pogrubienie górnej szyby, np. do 8 mm, łagodzi w pewnym stopniu wpływy klimatyczne. W tym przypadku niekorzystne skutki wywołują w zasadzie tylko obciążenia spadkiem ciśnienia atmosferycznego (lub wzrostem temperatury gazu). Korzystne może być tutaj zastosowanie zestawów o niskiej wartości ciśnienia początkowego  $p_0$ . Na przykładzie obliczeniowym pokazano również, że pogrubienie górnej szyby jest korzystne w przypadku płaskich przekryć obciążonych ssaniem wiatru.

## Bibliografia

- Feldmeier, F. (2006) *Klimabelastung und Lastverteilung bei Mehrscheiben-Isolierglas*. Stahlbau, 6(75), 467-478.
- Hart, R., Goudey, H., Arasteh, D. & Curcija, D.C. (2012) *Thermal performance impacts of center-of-glass deflections in installed insulating glazing units*. Energy and Buildings, 54, 453-460.
- Klindt, L.B. & Klein, W. (1997) *Glas als Baustoff. Eigenschaften. Anwendung. Bemessung*. Verlagsgesellschaft R. Müller. Köln-Braunsfeld. Germany
- Penkova, N., Krumov, K., Zashkova, L. & Kassabov, I. (2017) *Heat transfer and climatic loads at insulating glass units in window systems*. International Journal of Advances in Science Engineering and Technology, 5, 2, 22-28.
- Respondek, Z. (2017) *Rozkład obciążeń środowiskowych w wielokomorowej szybie zespolonej*. Construction of Optimized Energy Potential, 1(19), 105-110.
- Respondek, Z. (2018) *Obciążenia i ugięcia w szybach zespolonych o zróżnicowanej sztywności szyb składowych*. Construction of Optimized Energy Potential, 7, 1, 9-14.
- Solvason, K.R. (1974) *Pressures and stresses in sealed double glazing units*. Technical Paper No. 423, Division of Building Research, National Research Council Canada, Ottawa.
- Stratyi, P. (2017) *Numerical-and-analytical method of estimation insulated glass unit deformations caused by climate loads*. Advances in Intelligent Systems and Computing, 692, 970-979.
- Timishenko, S. & Woinowsky-Krieger, S. (1959) *Theory of plates and shells*. New York - Toronto - London, McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Velchev, D. & Ivanov, I.V. (2014) *A finite element for insulating glass units*. Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference, Bulgaria, Taylor & Francis Group, 311-318.

---

## Distribution of environmental loads in double-glazed insulating glass units placed non-vertically

**Abstract:** Insulating glass units (IGUs) transfer climate loads in a specific way. The gas in the sealed gaps between the component glass panes changes its parameters when the weather conditions change, which affects the resultant load of each of the component panes of the IGU. In the calculation models related to the phenomenon described, the vertical placing of glass is most often assumed and the glass self-weight load is omitted. The purpose of this article is to analyze the impact of horizontal or diagonal placing on static quantities in double-glazing IGUs under climatic loads. Taking into account the effect of self-weight required appropriate modification of the authors' calculation model. On the basis of the presented examples, conclusions were drawn about the resultant load, deflection and stress in IGUs of various structure loaded with variable atmospheric pressure, temperature, and wind.

**Keywords:** glass in construction, insulating glass units, climatic loads of buildings