

УДК 539.3

## РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВОГО СКЛІННЯ З ЕЛЕКТРООБІГРІВОМ

**П. П. Гонтаровський**, канд. техн. наук

[gontarpp@gmail.com](mailto:gontarpp@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-8503-0959

**Н. В. Сметанкіна**, д-р техн. наук

[nsmetankina@ukr.net](mailto:nsmetankina@ukr.net)

ORCID: 0000-0001-9528-3741

**С. В. Угримов**, д-р техн. наук

[sugrimov@ipmach.kharkov.ua](mailto:sugrimov@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0002-0846-4067

**Н. Г. Гармаш**, канд. техн. наук

[garm.nataly@gmail.com](mailto:garm.nataly@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-4890-8152

**І. І. Мележик**, канд. техн. наук

[melezhyk81@gmail.com](mailto:melezhyk81@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-8968-5581

Інститут проблем машинобудування  
ім. А. М. Підгорного НАН України,  
61046, Україна, м. Харків,  
вул. Пожарського, 2/10

*Забезпечення ефективної роботи й надійної безпечної експлуатації наземної спецтехніки різних видів, літальних апаратів є важливою й актуальною задачею. Збереження міцності, захисних властивостей і прозорості скління кабін техніки в широкому діапазоні температур при різних силових впливах – одна із ключових складових цієї проблеми. Для скління спецтехніки застосовуються багатошарові пакети, що виготовляються з різних видів скла, які з'єднуються між собою клейовими полімерними матеріалами. Для надійної й безвідмовної роботи спецтехніки в умовах низьких температур використовується скління з електрообігріванням, що дозволяє уникнути його обледеніння, а також захистити оглядову зону від запотівання. Виходячи з цього, важливим завданням, що впливає на ефективність використання спецтехніки, є забезпечення надійної роботи електрообігріву скла. За допомогою програмного комплексу, розробленого на основі методу скінченних елементів для аналізу тривимірного термонапруженого стану конструкцій, що дозволяє розглядати широкий клас практичних задач різної складності, розв'язані задачі нестационарної й стаціонарної теплопровідності й термопружності для трапецієвидного лобового електрообігрівного склопакета. Проведено дослідження термонапруженого стану скління із системою електрообігріву, яка дозволяє уникнути замерзання скла, що працює в умовах низьких температур. Визначені причини, з яких може відбуватися розширення склопакета (неприпустимі температурні режими, механічні силові впливи, порушення умов експлуатації). Багатошарове скління із системою електрообігріву використовується для літальних апаратів, військової техніки, наземного транспорту, які можуть експлуатуватися при різних температурах. З огляду на це дослідження їх термонапруженого стану й визначення можливих причин розширення дозволяє забезпечити надійність роботи й підвищити ефективність застосування спецтехніки в різних кліматичних умовах. Планується проведення подальших досліджень термонапруженого стану склоблока з урахуванням роботи терморегулятора і визначенням точок розташування термодатчиків, а також змін фізичних властивостей матеріалів і потужності нагрівального елемента зі зміною температури.*

**Ключові слова:** багатошарове скло, електрообігрів, заледеніння, температурні поля, термонапружений стан.

### Вступ

Найважливішим завданням при розробці наземної спецтехніки й літальних апаратів є забезпечення їх ефективної та надійної експлуатації. Однією із найвагоміших складових вважається збереження міцності, захисних властивостей і прозорості скління кабін у широкому діапазоні температур при різних силових впливах, що вказуються в технічних завданнях на виріб [1–3].

Для скління спецтехніки застосовуються багатошарові пакети, що виготовляються зі скла (силікатного, органічного) і з'єднуються між собою клейовими полімерними матеріалами [4]. Як клейові матеріали для скла можуть використовуватися полівінілбутираль (PVB), етіленвінілацетат, поліуретан або іономері [5]. Найчастіше для транспортного машинобудування обирають PVB, що має високу пластичність і адгезію до скла [6].

Якщо для скління звичайного автотранспорту, як правило, використовуються триплекси, то для бронемашин, літаків цивільної та військово-транспортної авіації – пакети із суттєво більшою кількістю

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.

© П. П. Гонтаровський, Н. В. Сметанкіна, С. В. Угримов, Н. Г. Гармаш, І. І. Мележик, 2022

шарів і, відповідно, жорсткістю пакета. Для зменшення ймовірності пошкодження екіпажу осколками й підвищення пулестійкості скління на зовнішню поверхню внутрішнього шару пакета можуть наклеюватися протиосколкові плівки або додатковий шар із полікарбонату [7, 8].

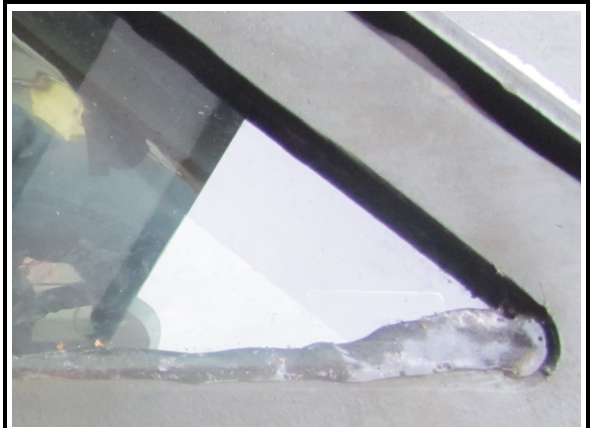
Для надійної і безвідмовної роботи спецтехніки в умовах низьких температур використовується скління з електрообігрівом, що дозволяє запобігати його зледенінню [9, 10]. Таке скло захищає оглядову зону від запотівання й заіндевіння. Виходячи з цього, забезпечення надійної роботи електрообігріву скла є важливим завданням, виконання якого впливає на ефективність використання спецтехніки.

Електрообігрів наноситься на внутрішню поверхню зовнішнього шару скла [9, 10]. Нагрівальний елемент може бути одно- або багатосекційним, плівковим або сітковим. Як правило, сегмент, що обігривається, має прямокутну форму, кути скла залишаються не нагрітими, що при недостатній потужності електрообігріву може призводити до виникнення наледеніння. На рис. 1 показано наледеніння, що утворюється на ділянках скла, які не обігриваються.

Скло повинно витримувати перепад температур, оскільки існує різниця між ними в кабіні й зовні, перегрів при відмові роботи терморегулятора, а також термічний удар при включенні електрообігріву в холодну пору року. Крім того, зовнішній шар скла зазнає значних температурних навантажень, що пояснюється суттєвим перепадом температур по товщині шару й на поверхні скла поблизу границі зони електрообігріву, а це може призвести до розтріскування покривного скла.

Описане явище характерне для скління літальних апаратів, де перепад температур усередині кабіни й зовні ще вищий, ніж у склінні наземної спецтехніки. На рис. 2 показано розтріскування покривного скла, що може виникати у літальних апаратах. Крім того, перегрів скла може привести до закипання клейового шару або зміни його адгезійних властивостей, що може викликати зменшення прозорості й навіть розшарування при помилках у проектуванні скла й неправильному способі його кріплення. При цьому відомо, що міцність усього склоблока істотно залежить від якості клейових шарів.

Як показано в роботах [6, 11, 12], механічні властивості й адгезія PVB залежать від товщини клейового шару й суттєво знижуються з підвищенням температури. Так, при зростанні температури з 20 °С до 40 °С сила на розрив зменшується практично в 4 рази для клею товщиною в 2,28 мм і приблизно в 2 рази при товщині клею в 0,76 мм [11]. Тому до системи обігріву скла, як правило, входить температурне реле, яке не допускає перегріву склоблока й розміцнення контакту між шарами. На рис. 3 наведений характерний дефект у вигляді розшарування, що утворювався при експлуатації скла.



*Рис. 1. Наледеніння на склі*



*Рис. 2. Тріщини в покривному склі*



*Рис. 3. Розшарування скла*

У загальному випадку розшарування склопакета може відбуватися з різних причин: порушення технології виготовлення пакета; неприпустимі температурні режими експлуатації, що приводять до втрати адгезійних властивостей клею, неправильне кріплення склоблока по контуру тощо.

Оскільки електрообігрівне скло використовується для сучасної авіаційної техніки й наземного транспорту, експлуатується в різних кліматичних умовах, дослідження температурних полів і напружень у склінні при зміні температури навколишнього повітря є актуальною задачею.

У роботі за допомогою оригінального програмного забезпечення, розробленого для аналізу тривимірного термонапруженого стану конструкцій [13], що дозволяє розглядати широкий клас практичних задач різної складності [14, 15], розв’язані задачі нестационарної і стаціонарної теплопровідності й термопружності для трапецієподібного в плані лобового електрообігрівного склопакета.

### Постановка задачі

Розглянуто багат шаровий пакет скла, що обігривається, його розміри (у мм) наведені на рис. 4. Додамо, що в пакеті 11 шарів скла, 9 з яких мають товщину 6,44 мм, а останні 2 – 5,8 мм. Скло склеєне плівкою полівінілбутирала товщиною 0,36 мм.

Нагрівальний елемент потужністю 90 Вт розміром 438×426 мм перебуває між першим і другим шаром скла. Розглянуто випадок, коли терморегулятор відсутній (або не працює).

Теплофізичні характеристики силікатного скла приймалися наступними [13]: коефіцієнт теплопровідності

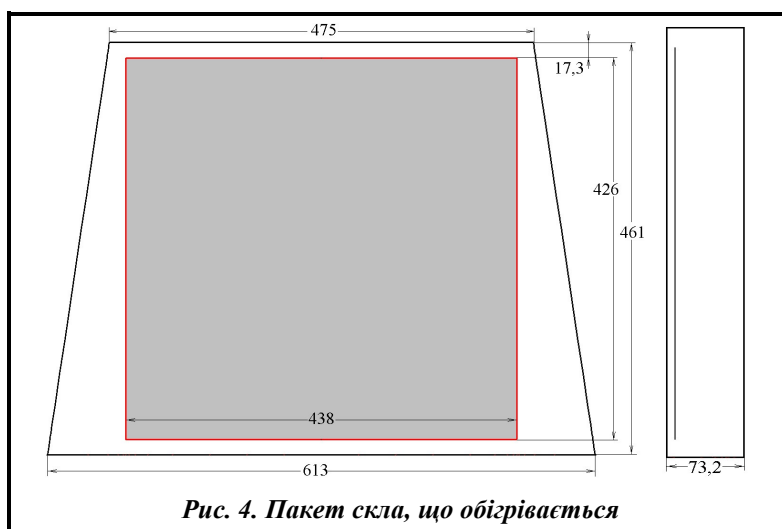


Рис. 4. Пакет скла, що обігривається

$K_{\text{glass}}=0,0161 \text{ Вт}/(\text{см}\cdot^\circ\text{C})$ ; об’ємна теплоємність  $\rho c_{\text{glass}}=1,875 \text{ Дж}/(\text{см}^3\cdot^\circ\text{C})$ ; для полівінілбутирала –  $K_{\text{glue}}=0,0017 \text{ Вт}/(\text{см}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\rho c_{\text{glue}}=1,6 \text{ Дж}/(\text{см}^3\cdot^\circ\text{C})$ .

Механічні характеристики скла [9] – густина матеріалу  $\rho_{\text{glass}}=2,5\cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{см}^4$ ; модуль пружності  $E_{\text{glass}}=64000 \text{ МПа}$ ; коефіцієнт Пуассона  $\nu_{\text{glass}}=0,22$ ; коефіцієнт лінійного температурного розширення  $\alpha_{\text{glass}}=9\cdot 10^{-6} \text{ 1}/^\circ\text{C}$ ; для клею –  $\rho_{\text{glue}}=1,2\cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{см}^4$   $E_{\text{glue}}=280 \text{ МПа}$ ;  $\nu_{\text{glue}}=0,39$ ;  $\alpha_{\text{glue}}=8,3\cdot 10^{-5} \text{ 1}/^\circ\text{C}$  відповідно. Припускається, що при температурі  $10^\circ\text{C}$  у пакеті відсутні залишкові напруження.

Перший шар клею із зовнішньої сторони містить тепловий елемент, який розглядається як об’ємне джерело тепла [13] потужністю

$$Q = \frac{90}{43,8 \cdot 42,64 \cdot 0,036} = 1,34 \text{ Вт}/\text{см}^3.$$

Граничні умови теплообміну по торцях пакета задавалися рівними  $T_\infty=10^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_l=0,00001 \text{ Вт}/(\text{см}^2\cdot^\circ\text{C})$ . Із внутрішнього боку теплообмін склопакета з повітрям при температурі  $10^\circ\text{C}$  здійснювався природньою конвекцією, а зовні пакет обдувався холодним повітрям.

Фізичні властивості повітря при тиску 760 мм рт. ст. наведено в табл. 1 [16],  $K_{\text{air}}$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\rho_{\text{air}}$  – густина,  $C_{p \text{ air}}$  – теплоємність,  $\nu_{\text{air}}$  – кінематична в’язкість,  $P_{r \text{ air}}$  – критерій Прандтля.

$T, ^\circ\text{C}$	$K_{\text{air}} \cdot 10^2, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$\rho_{\text{air}}, \text{ кг}/\text{м}^3$	$C_{p \text{ air}}, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$\nu_{\text{air}} \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$P_{r \text{ air}}$
-40	2,12	1,515	1,013	10,04	0,728
-30	2,20	1,453	1,013	10,80	0,723
-20	2,28	1,395	1,009	11,79	0,716
-10	2,36	1,342	1,009	12,43	0,712
0	2,44	1,298	1,005	13,28	0,707
10	2,51	1,247	1,005	14,16	0,705
20	2,59	1,205	1,005	15,06	0,703

Теплообмін пакета, що обдувається повітрям зі швидкістю  $\omega_{\text{п}}$ , м/с, визначався з використанням критеріальних залежностей [16]:

$$\alpha_{\text{air}} = \frac{Nu \cdot K_{\text{air}}}{l} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

де  $Nu = 0,032 \cdot Re^{0,8}$ ,  $Re = \frac{\omega_{\text{air}} \cdot l}{\nu_{\text{air}}}$ ,  $Nu$  – число Нуссельта,  $Re$  – число Рейнольдса,  $l$  – довжина стінки, рівна 0,5 м.

Отримані значення коефіцієнтів теплообміну залежно від температури й швидкості повітря наведені в табл. 2.

При природній конвекції повітря критерій Нуссельта

$$Nu = 0,15 \cdot (G_r \cdot P_r)^{0,33},$$

критерій Грасфорда  $G_r$

$$G_r = \frac{\beta l^3 g \Delta T}{\nu_{\text{air}}^2},$$

де  $\beta$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря,  $l=0,5$  м,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>,  $\Delta T$  – характерний перепад температури.

Тоді

$$G_r = \frac{0,5^3 \cdot 9,81 \cdot 10}{303 \cdot 14^2} = 0,21 \cdot 10^6,$$

$$Nu = 0,15 \cdot (0,21 \cdot 0,705 \cdot 10^5)^{0,33} = 73,2,$$

$$\alpha_{\text{air}} = \frac{73,2 \cdot 2,51 \cdot 10^5}{0,5} = 3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Оскільки конструкція скла симетрична, граничні умови однакові, розрахунки проводилися для половини пакета. Розрахункова схема склопакета з дискретизацією на скінченні елементи наведена на рис. 5. У площині  $X=0$  мають місце граничні умови симетрії  $u_x=0$ ;  $\tau_{yz}=\tau_{zx}=0$  – для задачі механіки,  $q=0$  – теплоізоляція для задачі теплопровідності.

### Основні результати досліджень

Розв'язання нестационарної задачі теплопровідності проводилося для наступних значень часу:  $t=60$  с, 120 с, 240 с, 480 с, 900 с, 1800 с, 3600 с, 7200 с. Розглядалося також рішення стаціонарної задачі теплопровідності.

Необхідно зазначити, що теплопровідність матеріалів склопакета настільки низька, що навіть через дві години температурне поле далеке від стаціонарного. Це пояснюється також низькою потужністю нагрівального елемента. Значна частина тепла від нагрівального елемента виходить через площину, що обдувається повітрям зовні. У зв'язку із цим для кожного значення температури зовнішнього повітря можна оцінити, при якій швидкості обтікання почнеться обмерзання склопакета, тобто температура зовнішньої поверхні на стаціонарному режимі дорівнюватиме 0 °С. Потужність нагрівання, що припадає на 1 м<sup>2</sup> поверхні, становить:

$$q = \frac{90}{0,438 \cdot 0,4264} = 482 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Потік тепла через зовнішню поверхню в середній частині склопакета рівний [17]:

$$q = \alpha_{\text{air}}(t_{\text{glass}} - t_{\text{air}}) = -\alpha_{\text{air}} \cdot t_{\text{air}} = 0,0482 \text{ Вт}/\text{см}^2.$$

Використовуючи це співвідношення, складемо таблицю коефіцієнтів теплообміну, при яких починається обмерзання (табл. 3).

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів теплообміну  $\alpha_{\text{п}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С)

$\omega_{\text{air}}$ , м/с	Температура повітря $T_{\text{air}}$ , °С				
	-40	-30	-20	-10	0
1	7,79	7,6	7,3	7,1	7,00
4	23,60	22,9	21,6	21,0	21,00
8	41,10	40,0	38,3	37,4	36,86
16	71,60	69,8	67,0	65,1	64,20

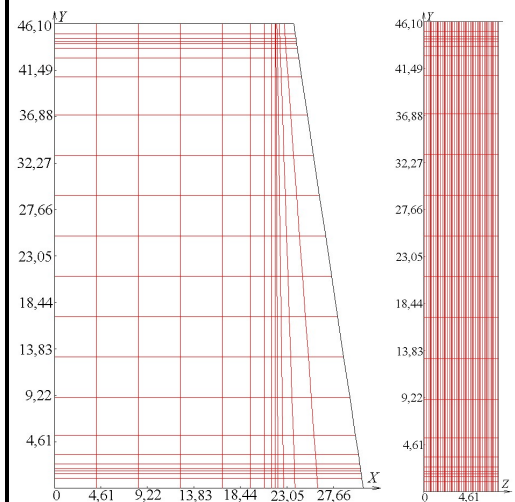


Рис. 5. Розрахункова схема склопакета

З використанням табл. 2 шляхом інтерполяції можна знайти швидкість повітря, при якій відбудеться обмерзання.

Число Нуссельта, при якому відбудеться обмерзання зовнішньої поверхні склопакета, становить

$$Nu = \frac{\alpha_{air} \cdot l}{K_{air}}$$

число Рейнольдса рівне

$$Re = \left( \frac{Nu}{0,032} \right)^{1,25} = \left( \frac{\alpha_{air} \cdot l}{K_{air} \cdot 0,032} \right)^{1,25}$$

Знаючи число Рейнольдса  $Re$ , обчислимо швидкість потоку повітря за наступною залежністю:

$$\omega_{air} = \frac{Re \cdot \nu_{air}}{l}$$

Значення швидкості повітря, за якого відбудеться обмерзання зовнішньої поверхні склопакета при потужності джерела нагрівання 90 Вт, наведено в табл. 4.

Розглядався також випадок, коли при обігріві сила струму становила 10,4 А при напрузі 26 В. У такому разі потужність джерела обігріву становитиме

270 Вт, що у 3 рази більше вказаного вище. При цьому швидкість потоку повітря, за якої відбудеться обмерзання зовнішньої поверхні склопакета, збільшиться у 3,95 рази (табл. 5).

Розподіл температури при швидкості вітру 4 м/с і температурі повітря  $-10^{\circ}\text{C}$  і  $-20^{\circ}\text{C}$  на зовнішній поверхні склопакета наведений на рис. 6 і 7, а в шарі розміщення нагрівального елемента, потужністю 90 Вт, – на рис. 8 і 9.

Однак слід підкреслити, що у випадку природної конвекції повітря (при швидкості потоку 0 м/с і коефіцієнті теплообміну  $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , для випадку, коли

**Таблиця 3. Значення коефіцієнтів теплообміну, при яких починається обмерзання**

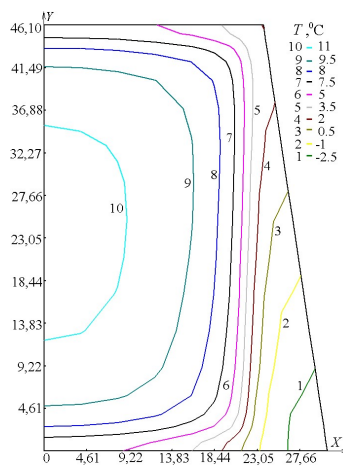
$T_{air}, ^{\circ}\text{C}$	-40	-30	-20	-10	-5	0
$\alpha_{air}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$	12	16,08	34,1	48,2	96	$\infty$

**Таблиця 4. Значення швидкості повітря, при якій відбуватиметься обмерзання, залежно від температури**

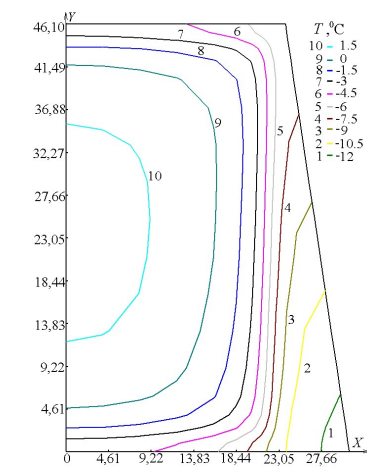
$T_{air}, ^{\circ}\text{C}$	-40	-30	-20	-10
$\omega_{air}, \text{м/с}$	1,72	2,55	4,42	10,61

**Таблиця 5. Значення швидкості повітря, за яких відбуватиметься обмерзання, при потужності джерела обігріву 270 Вт**

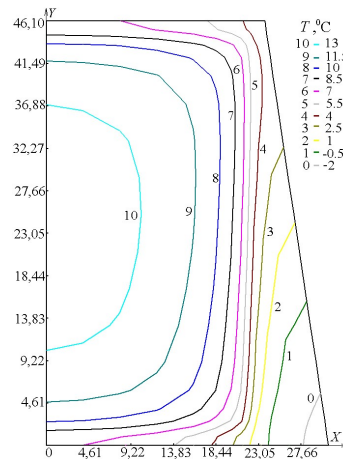
$T_{air}, ^{\circ}\text{C}$	-40	-30	-20	-10
$\omega_{air}, \text{м/с}$	6,8	10,06	17,45	42



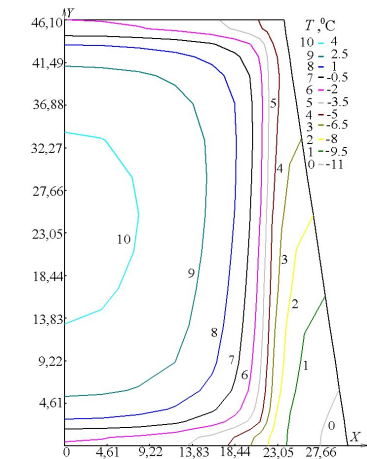
**Рис. 6. Розподіл температури на зовнішній поверхні склопакета при температурі повітря  $-10^{\circ}\text{C}$**



**Рис. 7. Розподіл температури на зовнішній поверхні склопакета при температурі повітря  $-20^{\circ}\text{C}$**



**Рис. 8. Розподіл температури у шарі склопакета з нагрівальним елементом при температурі повітря  $-10^{\circ}\text{C}$**



**Рис. 9. Розподіл температури у шарі склопакета з нагрівальним елементом при температурі повітря  $-20^{\circ}\text{C}$**

потужність нагрівального елемента становить 90 Вт, температура зовнішньої поверхні склопакета при температурі повітря  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  і необмежено довгому обігріві (стаціонарний режим теплопровідності) може досягати  $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в шарі розміщення нагрівального елемента –  $+34\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При температурі повітря  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ці температури можуть досягати  $+86\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $+88\text{ }^{\circ}\text{C}$  відповідно.

Для випадку нагрівального елемента потужністю 270 Вт ці температури значно вищі й досягають  $127\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $197\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  відповідно. Для PVB такі температури неприйнятні, граничні температури для PVB становлять  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . З огляду на це, щоб уникнути перегріву склопакета в приміщенні або при додатній температурі зовнішнього повітря, доцільно встановити термопари для виміру температури склопакета й реле, яке виключало б нагрівальний елемент, коли температура досягне певного недопустимого значення.

Перепади температур у склопакеті дуже невеликі, тому рівень температурних напружень також низький. Максимальні розтягувальні температурні напруження у клейових шарах у напрямку товщини склопакета становлять близько  $0,2\text{ МПа}$ , що не перевищує припустимого значення  $40\text{ МПа}$ .

У розрахунках передбачалося, що фізичні властивості скла й PVB не залежать від температури. Не враховувалася також зміна опору нагрівального елемента при підвищенні або зниженні температури, що впливає на потужність нагрівального елемента. Крім того, невідомими є залишкові напруження, які виникають при виготовленні склопакета і підсумовуються з експлуатаційними напруженнями.

## Висновки

Електрообігрівне скло широко використовується на наземному транспорті й літальних апаратах для уникнення зледеніння й запотівання світлопрозорих конструкцій. Дослідження роботи системи електрообігріву й термонапруженого стану скла дозволяє ще на стадії проектування зменшити ризик ушкодження скла при експлуатації й підібрати раціональні параметри електрообігріву. Це має важливе значення для забезпечення надійної та ефективної експлуатації транспортних засобів у різних погодних умовах.

Проведені розрахункові дослідження термонапруженого стану багатошарового скління із системою електрообігріву при використанні в зимових і літніх умовах. Розрахунки проводилися для 21-шарового пакета, що складається з 11 шарів силікатного скла, з'єднаних шарами PVB.

Установлено, що скло при довгостроково працюючому електрообігріві значно нагрівається, а це, у свою чергу, призводить до перегріву шару PVB, що неприпустимо, бо може зумовити розшарування пакета, оскільки адгезійні властивості PVB суттєво залежать від температури, або навіть до закипання PVB, що проявляється в утворенні пухирів у клейовому шарі. Виходячи з цього, для запобігання такого перегріву скло повинно забезпечуватися системою терморегуляції.

Надалі планується провести дослідження термонапруженого стану склоблока з урахуванням роботи терморегулятора і визначенням точок розташування термодатчиків, а також зміни фізичних властивостей матеріалів і потужності нагрівального елемента зі зміною температури.

## Література

1. Federal Aviation Regulation. PART 25 – Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes. Section 25.775. Windshields and windows. 1964. P. 18318. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-25>.
2. ДСТУ 4546:2006. Скло в будівництві. Захисне скління. Випробування та класифікація за кулетривкістю (EN 1063:1999, MOD). Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 10 с.
3. Hontarovsky P. P., Smetankina N. V., Ugrimov S. V., Garmash N. G., Melezhyk I. I. Numerical investigations of the crack resistance of ion exchange strengthened sheet glass under flexural deformations. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy mashynobuduvannia*. 2021. Vol. 24. No. 3. P. 45–51. <https://doi.org/10.15407/pmach2021.03.027>.
4. Ugrimov S., Smetankina N., Kobylnik V. Modeling the response of multilayer glazing to distributed and localized force loading. *Nonlinear Mechanics of Complex Structures. Advanced Structured Materials*. Altenbach H., Amabili M., Mikhlin Y. V. (eds.) Cham: Springer, 2021. Vol. 157. P. 103–123. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75890-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75890-5_7).
5. Novotny M., Poot B. Influence of temperature on laminated glass performances assembled with various interlayers. *Challenging Glass Conference 5: Conference Proceedings (Ghent, Belgium, 16–17 June 2016)*. Ghent: Ghent University, 2016. Vol. 5. P. 219–232. <https://doi.org/10.7480/cgc.5.2248>.

6. Chen S., Chen X., Wu X. The mechanical behaviour of polyvinyl butyral at intermediate strain rates and different temperatures. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 182. P. 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.080>.
7. Shim G. I., Kim S. H., Ahn D. L., Park J. K., Choi S. Development of thin and lightweight bulletproof windows using strengthened SLS glass by ion exchange. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2015. Vol. 52. P. 123–127. <https://doi.org/10.4191/kcers.2015.52.2.123>.
8. Walley S. M., Field J., Blair P., Milford A. The effect of temperature on the impact behaviour of glass/polycarbonate laminates. *International Journal of Impact Engineering*. 2004. Vol. 30. Iss. 1. P. 31–53. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(03\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(03)00046-0).
9. Smetankina N. V., Postnyi O. V., Merkulova A. I., Merkulov D. O. Modeling of non-stationary temperature fields in multilayer shells with film heat sources. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): Conference Proceedings* (Kharkiv, Ukraine, 5–10 October 2020). Kharkiv: IEEE, 2020. P. 242–246. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250139>.
10. Hoejowska S., Orzechowski T., Pawiska A. Thermal analysis of the car windscreen. *EPJ Web of Conferences*. 2019. Vol. 213. Paper ID 02027. 6 p. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921302027>.
11. Samieiana M. A., Cormieb D., Smith D., Wholeyb W., Blackmana B. R. K., Deara J. P., Hoopera P. A. On the bonding between glass and PVB in laminated glass. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019. Vol. 214. P. 504–519. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.04.006>.
12. Froli M., Lani L. Adhesion, creep and relaxation properties of PVB in laminated safety glass. *GLASS PERFORMANCE DAYS 2011: Conference Proceedings* (Tampere, Finland, 17–20 June 2011). Tampere, 2011. P. 839–848.
13. Hontarovskiy P. P., Smetankina N. V., Garmash N. H., Melezhyk I. I. Analysis of crack growth in the wall of an electrolyser compartment. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy mashynobuduvannia*. 2020. Vol. 23. No. 4. P. 38–44. <https://doi.org/10.15407/pmach2020.04.038>.
14. Shul'zhenko N. G., Gontarovskii P. P., Matyukhin Yu. I., Garmash N. G. Numerical analysis of the long-term strength of the rotor disks of steam turbines. *Strength of Materials*. 2010. Vol. 42. P. 418–425. <https://doi.org/10.1007/s11223-010-9232-2>.
15. Gontarovskiy P., Smetankina N., Garmash N., Melezhyk I. Numerical analysis of stress-strain state of fuel tanks of launch vehicles in 3D formulation. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*. Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds.) Cham: Springer, 2021. Vol. 188. P. 609–619. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_52).
16. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Москва: Энергия, 1983. 320 с.
17. Kreith F., Black W. Z. Basic heat transfer. London: Harper and Row, 1980. 556 p.

Надійшла до редакції 10.05.2022