

УДК 536.21: 691

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ МЕТАЛЛОПЛАСТИКОВЫМИ ОКНАМИ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

КОСТИН В. А.<sup>1</sup> *д.т.н.*

АЛЕКСЕЕНКО И.И.<sup>1</sup>, *м.н.с.*

<sup>1</sup> Отдел физико-химических методов исследований материалов, Институт электросварки им. Е.О.Патона, ул. Боженко, 11, 03680, Киев-150, Украина, тел. +38 (068) 434-34-22, e-mail: [office\\_22@ukr.net](mailto:office_22@ukr.net), orcid ID:0000-0002-2677-4667

<sup>1</sup> Отдел физико-химических методов исследований материалов, Институт электросварки им. Е.О.Патона, ул. Боженко, 11, 03680, Киев-150, Украина, тел. +38 (068) 434-34-22, e-mail: [office\\_22@ukr.net](mailto:office_22@ukr.net)

**Аннотация.** *Цель.* Построение компьютерной модели и проведение расчетов температурных полей в ПВХ окнах в зависимости от характеристик профиля и типа используемых материалов. *Методика.* Моделирование было проведено для одно-камерного профиля с одним стеклом, однокамерного профиля со стеклопакетом из двух стекол пространство между которыми было заполнено воздухом и 3-камерным профилем с двойным стеклопакетом заполненным азотом. В качестве металлического профиля был выбран – алюминий ( марка АД1), уплотнительные прокладки - резина EPDM (пероксидально сшитый этилен-пропилен-диен-каучук полученный синтетическим способом), вставки – полиамидные. Для проведения компьютерного моделирования использовали расчетный пакет COMSOL Multiphysics. Для расчета эффективных коэффициентов теплопередачи и теплопроводности внутри профиля окна использовали приближенные уравнения для замкнутых полостей. *Результаты.* Проведенное численное моделирование энергоэффективности металлопластиковых окон показало, что наиболее теплостойкими из рассматриваемых окон являются трехкамерные окна с 2-ым стеклопакетом заполненным воздухом. Использование металлопластиковых окон позволяет снизить падение температуры во внутренних жилых помещениях с 10 °С до 1.5 °С при температуре окружающей среды – 40°С. *Научная новизна.* Установлено, что наиболее высокой энергоэффективностью из рассмотренных в данной работе окон обладают 3-х камерные металлопластиковые окна стеклопакеты которых заполнены вакуумом. *Практическая значимость.* Результаты проведенного компьютерного моделирования показали возможности использования расчетного пакета COMSOL Multiphysics при анализе энергоэффективности использования современных металлопластиковых окон. Расчетная программа в виде отдельного приложения может быть использована на объектах гражданского строительства и при разработке новых высокоэффективных строительных конструкций и сооружений.

*Ключевые слова:* металлопластиковые окна; температура; теплопередача; COMSOL Multiphysics; коэффициенты теплопередачи, эквивалентная теплопроводность.

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ МЕТАЛОПЛАСТИКОВИМИ ВІКНАМИ У СУЧАСНОМУ БУДІВНИЦТВІ

КОСТИН В.А.<sup>1</sup> *д.т.н.*,

АЛЕКСЕЄНКО І.І.<sup>1</sup>, *м.н.с.*

<sup>1</sup> Відділ фізико-хімічних методів дослідження матеріалів, Інститут електросварювання ім. Є.О.Патона, вул. Боженко, 11, 03680, Київ-150, Україна, тел. +38 (068) 434-34-22, e-mail: [office\\_22@ukr.net](mailto:office_22@ukr.net), orcid ID:0000-0002-2677-4667

<sup>1</sup> Відділ фізико-хімічних методів дослідження матеріалів, Інститут електросварювання ім. Є.О.Патона, вул. Боженко, 11, 03680, Київ-150, Україна, тел. +38 (068) 434-34-22, e-mail: [office\\_22@ukr.net](mailto:office_22@ukr.net)

**Анотація.** *Мета.* Побудова комп'ютерної моделі і проведення розрахунків температурних полів в ПВХ вікнах в залежності від характеристик профілю і типу використаних матеріалів. *Методика.* Моделювання було проведено для одно-камерного профілю з одним склом, однокамерного профілю зі склопакетом з двома склами простір між якими було заповнено повітрям і 3-камерним профілем з 3-х склопакетом заповненим гелієм. Як металевого профілю був обраний - алюміній (марка АД1), ущільнювальні прокладки - гума EPDM (пероксидально зшитий етилен-пропілен-діен-каучук отриманий синтетичним способом), вставки - поліамідні. Для проведення комп'ютерного моделювання використовували розрахунковий пакет COMSOL Multiphysics. Для розрахунку ефективних коефіцієнтів теплопередачі і теплопровідності усередині профілю вікна використовували наближені рівняння для замкнутих порожнин. *Результати.* Проведене чисельне моделювання енергоефективності металлопластикових вікон показало, що найбільш теплостійкими з розглянутих вікон є трикамерні вікна з подвійним склопакетом заповненим азотом. Використання металлопластикових вікон дозволяє знизити падіння температури у внутрішніх житлових приміщеннях з 10 °С до 1.5 °С при температурі навколишнього середовища - 40°С. *Наукова новизна.* Встановлено, що найбільш високою енергоефективністю з досліджених у даній роботі вікон мають 3-х камерні металлопластикові вікна склопакети яких заповнені вакуумом. *Практична значимість.* Результати

проведеного комп'ютерного моделювання показали можливості використання розрахункового пакету COMSOL Multiphysics при аналізі енергоефективності використання сучасних металопластикових вікон. Розрахункова програма у вигляді окремого додатка може бути використана на об'єктах цивільного будівництва і при розробці нових високоефективних будівельних конструкцій та споруд.

*Ключові слова:* металопластикові вікна; температура; теплопередача; COMSOL Multiphysics; коефіцієнти теплопередачі, еквівалентна теплопровідність.

## NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER PROCESS PLASTIC WINDOWS IN MODERN BUILDING

KOSTIN V. A.<sup>1</sup> *Dr. Sc. (Tech.)*,  
ALEKSEENKO I.I.<sup>1</sup>, *JR. Sc. (Tech.)*

**Annotation. Purpose** Building a computer model and carrying out calculations of temperature fields in PVC windows, depending on the profile of the characteristics and the type of materials used. **Methodology.** Simulations were conducted for one-chamber profile with a single glass, single-chamber profile with glass of the two glasses the space between them was filled with air and 3-chamber profile with double glazing filled with nitrogen. As the metal profile has been selected - aluminum (AD1 ) gaskets - EPDM rubber (peroksidalno crosslinked ethylene-propylene-diene rubber prepared synthetically), inserting - polyamide. For the computer simulation used the settlement package COMSOL Multiphysics. To calculate the effective heat transfer coefficients and thermal conductivity within the profile of the window using the approximate equations for closed cavities. **Findings.** The numerical modeling of the energy efficiency of plastic windows showed that most of the heat-resistant windows are considered three-compartment windows with second glazing filled with air. The use of plastic windows can reduce the temperature drop in the interior living spaces from 10 ° C to 1.5 ° C at ambient temperature - 40 ° C. **Originality.** It was found that the most energy efficient of those surveyed in this study have windows 3-chamber plastic windows windows which fill the vacuum. **Practical value.** The results of the computer simulation showed the possibility of using the settlement package COMSOL Multiphysics analysis with energy efficiency using modern plastic windows. Estimated program as a standalone application can be used in the civil construction and the development of new high-efficiency building designs and construction of the facility.

*Keywords:* metal-plastic windows; temperature; heat transfer; COMSOL Multiphysics; heat transfer coefficients, the equivalent thermal conductivity.

### Введение

Начавшийся в последнее время стремительный рост тарифов на услуги тепло- и электрогенерирующих компаний делает задачи энергосбережения и повышения энергоэффективности особенно актуальными. Не последнее место в этом ряду занимает использование металлопластиковых окон в строительстве жилых и промышленных предприятий.

Металлопластиковые окна [1,2], это обычные окна из поливинилхлоридного (ПВХ) профиля оснащенные металлическим (чаще всего алюминиевым) армированием (рис.1).

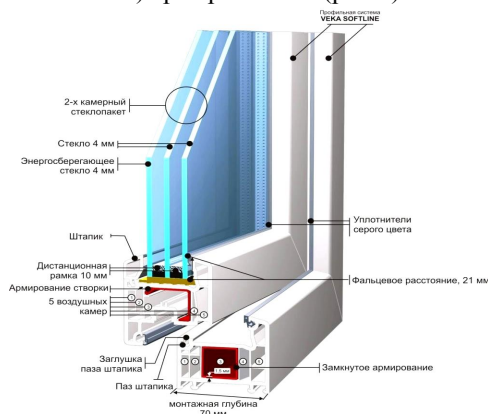


Рис. 1. Общий вид металлопластиковых окон /  
General view of the metal-plastic windows.

Поливинилхлорид - это материал, относящийся к группе термопластов, которые после формования изделия сохраняют способность к повторной переработке, что и делает его актуальным при использовании. Интересно, что металлопластиковые окна могут быть различной формы, так как сама система профилей универсальна и существует возможность их комбинирования. Металлопластиковые окна, могут быть различной формы, размера, состоять из различных материалов.

Отличительной особенностью данного вида окон является рама, изготовленная из армированного ПВХ профиля которая крепко устанавливается в оконном проеме. Профиль внутри окна имеет воздушные камеры, с помощью которых осуществляется теплоизоляция конструкции. Как правило, для металлопластиковых окон используется одно, трех и пяти- камерный профиль. Стеклопакет также может состоять из нескольких слоев. При этом, чаще всего, пространство между стеклами заполняют осушенным воздухом или аргоном.

Большое разнообразие производителей металлопластиковых окон как отечественного так и зарубежного производства (Aluplast, WDS, REHAU, KBE, VEKA и др.) и многообразие используемых ими материалов и типов профилей приводит к тому, что наблюдается заметное различие в их тепло-сберегающих характеристиках.

Таблица 1

**Теплофизические свойства материалов/  
Thermal properties of materials**

Материал	Марка	Теплофизические свойства		
		$k$ , Вт/(м*К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , Дж/(кг*К)
Профиль	АД1	160	2800	880
Профиль	Сталь 3	50	7800	450
Профиль	Дерево	0.13	500	1600
Профиль	PVC	0.17	1390	1900
Резина	EPDM	0.25	1150	1000
Вставка	Poliamid	0.035	50	1030
Стекло	SiO2	1.00	2500	750
Стекло	Quartz	1.40	2210	730
Полости	Аргон	0.005	5.80	520
Полости	Воздух	0.034	1.23	1008

$k$  – коэффициент теплопроводности;  $\rho$  - плотность,  $C_p$  –теплоемкость.

Вместе с тем, в настоящее время в различных областях промышленности широко применяются методы компьютерного моделирования [3,4] основанные на специализированном программном обеспечении.

Современные системы инженерного анализа (САЕ) применяются совместно с системами автоматизированного проектирования (САД) позволяют при помощи расчётных методов (метод конечных элементов, метод конечных разностей и др.) оценить, как поведёт себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации, без проведения натуральных испытаний и привлечения больших затрат времени и средств.

В связи с этим, использование методов компьютерного моделирования для анализа температурных условий эксплуатации ПВХ окон, позволит с бытовой точки зрения правильно подобрать окна, а с научной – оптимизировать характеристики профиля и тип используемых материалов.

**Цель**

Таким образом, целью настоящей работы являлось построение компьютерной модели и проведение расчетов температурных полей в ПВХ окнах в зависимости от характеристик профиля и типа используемых материалов.

**Материал**

Моделирование было проведено для однокамерного профиля с 1-им стеклом (рис.2 а), однокамерного профиля со стеклопакетом из 2-х стекол пространство между которыми было заполнено воздухом (рис.2 б) и 3-камерным профилем с 2-ым стеклопакетом заполненным воздухом. В качестве металлического профиля был выбран – алюминий ( марка АД1), уплотнительные прокладки - резина EPDM (пероксидально сшитый этилен-пропилен-диен-каучук полученный синтетическим способом), вставки – полиамидные. Уплотнители из резины EPDM имеют хорошую стойкость к нагреву и охлаждению, устойчивы к сжатию, действию атмосферных осадков. Теплофизические свойства материалов используемых в процессе моделирования приведены в табл. 1

**Методика расчетов и результаты**

Для проведения компьютерного моделирования использовали расчетный пакет междисциплинарных исследований COMSOL Multiphysics [5], который позволяет объединить задачи диффузии, тепло- и массопереноса, гидродинамики, механики деформируемого твердого тела в одну взаимосвязанную задачу. Взаимное расположение различных материалов используемых при моделировании представлено на рис.3.

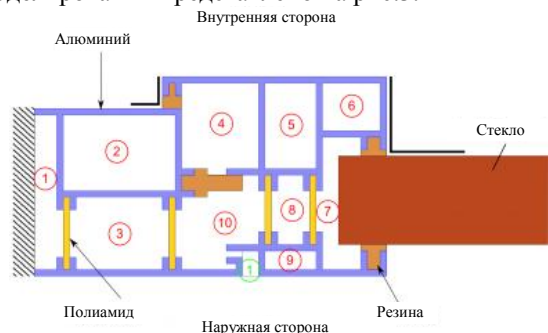


Рис. 3. Материал профиля окна / Window materials

В работе решение уравнения теплопроводности проводилось методом конечных элементов (МКЭ), путем построения неоднородной адаптивной сетки и задания в каждой ячейке сетки интерполяционного многочлена Лагранжа второго порядка [6].

Алгебраическую систему уравнений, полученную дискретизацией обыкновенных дифференциальных уравнений, решали в пакете расчетов MUMPS.

Уравнение теплопроводности имеет следующий вид

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T)$$

Тепловой поток для внутренней и внешней стороны оконного профиля задается уравнением Ньютона

$$-n \cdot (-k \nabla T) = h \cdot (T_{внеш} - T)$$

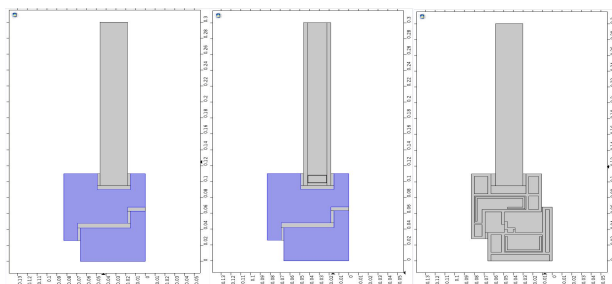


Рис. 2. Профили окон для моделирования / Modeling window profiles

где  $T_{внеш}$  – внешняя температура ( $T=20^{\circ}\text{C}$  – для внутренней стороны окна,  $T_e = -40^{\circ}\text{C} \dots +0^{\circ}\text{C}$  – для наружной).

Особенностью данной задачи является наличие нескольких (от 1-го до 5-и) замкнутых пространств внутри профиля окна. Традиционные коэффициенты теплопередачи  $h$  и теплопроводности  $k$  в такой постановке задачи использовать нельзя.

Коэффициент теплопередачи обратно пропорционален термическому сопротивлению  $h=1/R_s$ .

Для непрветриваемых прямоугольных полостей, эквивалентная теплопроводность определялась по формуле [7]:

$$k_{eq} = d/R$$

где  $d$  - размер полости в направлении теплового потока, а  $R$  – термическое сопротивление определяемое по формуле:

$$R = 1/(h_a + h_r)$$

где  $h_a$  – конвективный коэффициент теплопередачи,  $h_r$  – радиационный.

Коэффициенты теплопередачи задаются выражениями:

$$h_r = 4\sigma T_m^3 E F$$

$$h_a = \begin{cases} C_1 / d & \text{если } b \leq 5 \text{ мм} \\ \max(C_1 / d, C_2 (\Delta T / (1\text{K})^{1/3})) & \text{наоборот} \end{cases}$$

где  $C_1=0.025 \text{ Вт}/(\text{м}^3\text{К})$ ,  $C_2=0.73 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ,  $\Delta T$  – максимальная разница температур в полостях,  $\sigma=5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$  – константа Стефана-Больцмана,  $T_m$  – средняя температура на границе полости,  $E$  – межповерхностное излучение, которое определяется из выражения:

$$E = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$$

$\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  - коэффициенты поверхностного излучения (приняты равными 0.9),  $F$ - фактор сечения:

$$F = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{b} + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2} \right)$$

$d$  – размер полости а направлении теплоотвода,  $b$  – размер полости в перпендикулярном направлении.

Физико-химические свойства материала окон представлены в табл. 1

Расчетные значения температур в металлопластиковых окнах при температуре окружающей среды  $-40^{\circ}\text{C}$  представлены на рис.4.

Анализ полученных результатов (рис.5) показывает, что со снижением температуры окружающей среды (с  $+0^{\circ}\text{C}$  до  $-40^{\circ}\text{C}$ ) температура в помещении конечно же снижается. Причем при  $-40^{\circ}\text{C}$  в зависимости от типа используемого окна это различие может составлять до  $10^{\circ}\text{C}$ .

Расчеты показывают, что наиболее теплостойкими из рассматриваемых металлопластиковых окон, т.е. тех которые хуже всего отдают тепло, являются трехкамерные окна с 2-ым стеклопакетом заполненным воздухом. Наибольшее

снижение температуры в помещении составляет всего  $3.5^{\circ}\text{C}$  при температуре воздуха  $-40^{\circ}\text{C}$ .

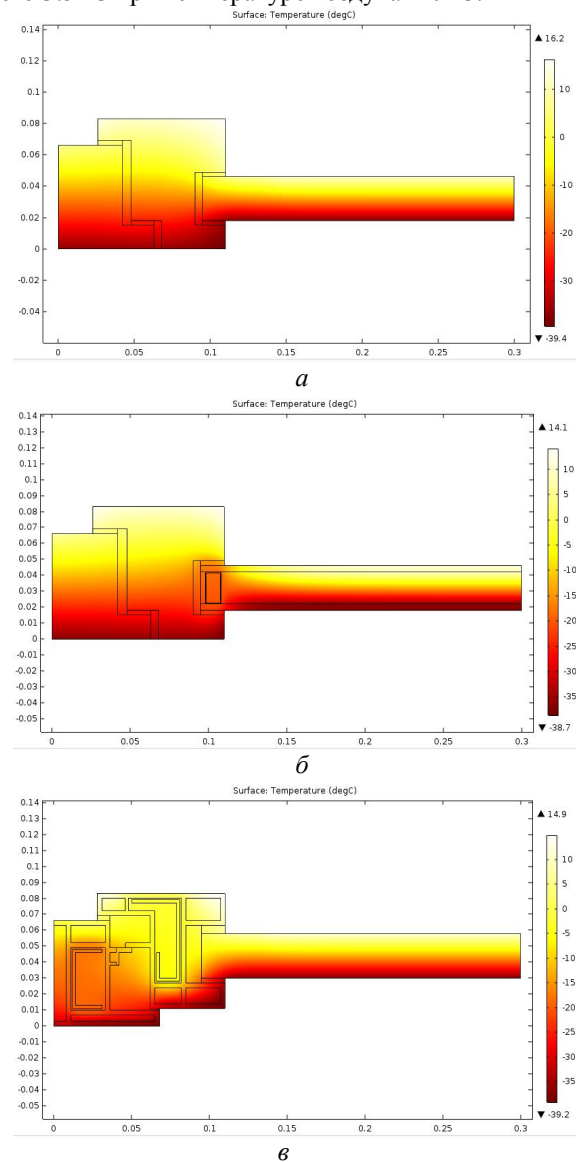


Рис. 4. Расчетные температурные поля профиля окна при температуре внешней среды  $-40^{\circ}\text{C}$  / Calculated temperature fields window at ambient temperature  $-40^{\circ}\text{C}$

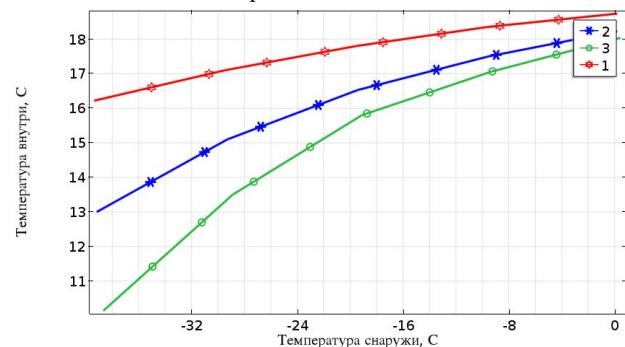


Рис.5 Влияние температуры окружающей среды на температуру внутри помещения: 1-3х камерные, 2 - однокамерные + воздух; 3 -однокамерные окна/ Influence of ambient temperature on the temperature inside the room



Расчетные значения температур внутри металлопластикового профиля моделируемых окон представлены на рис.6.

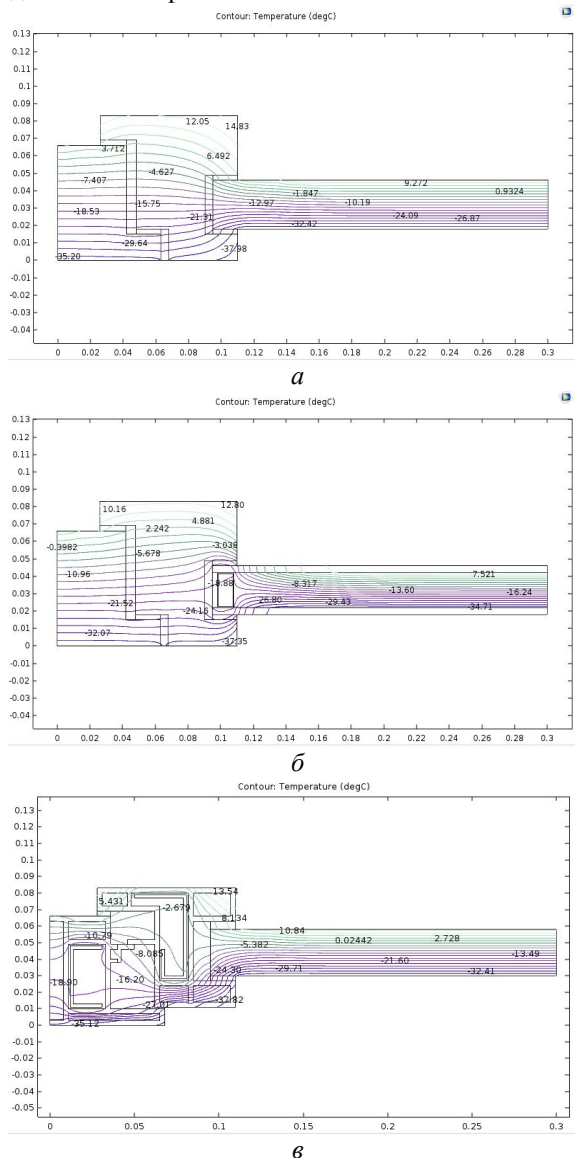


Рис. 6. Расчетные изолинии температурных полей различных окон при температуре внешней среды -40°C / Calculated isoline temperature fields window at ambient temperature -40 °C

Наименее термостойкими являются однокамерные окна с 1 одним стеклом. Падение температуры в этом случае достигает -10 °C.

Представляет практический интерес вопрос как поведут себя металлопластиковые окна в зависимости от того каким газом будет заполнен стеклопакет.

В рамках данной работы было промоделировано влияние различных газов – воздуха, аргона, гелия и его полное отсутствие ( вакуума ) – на термостойкость окон и характер изменения температуры внутри помещения.

Расчетные результаты по влиянию заполняющего стеклопакет газа на температуру внутри помещения представлены на рис.7.

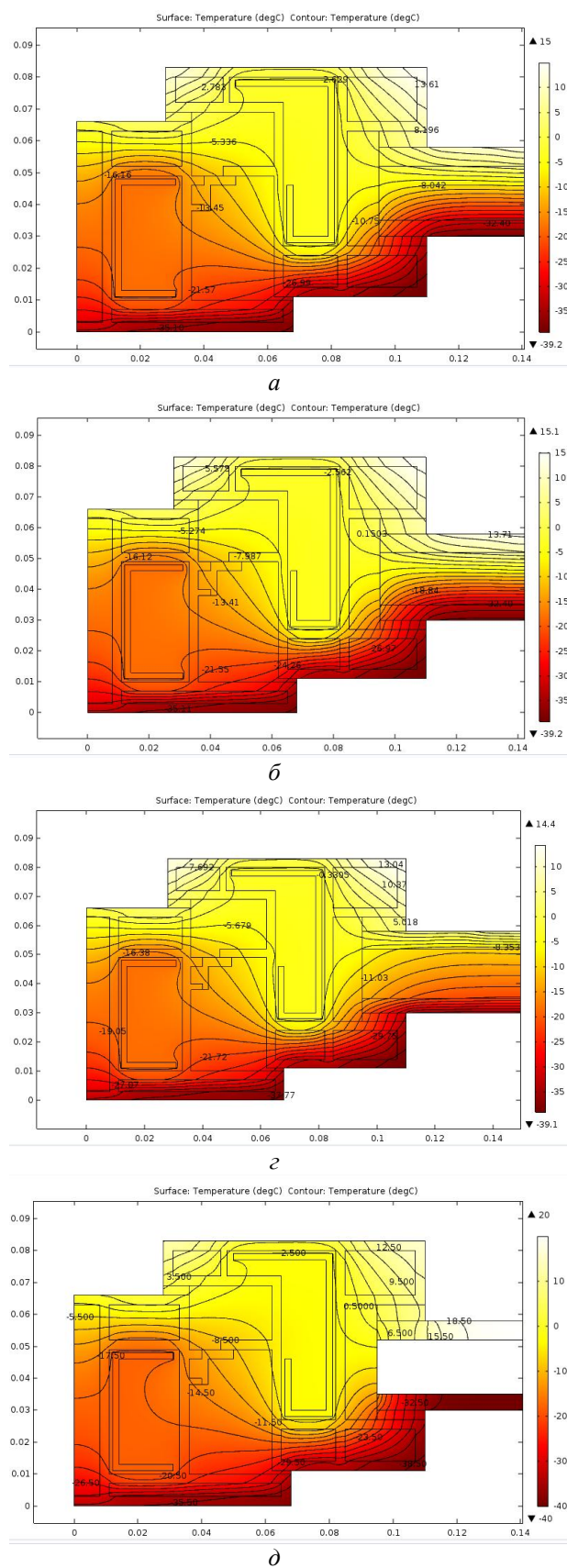


Рис.7 Влияние состава заполняющего газа на температуру металлопластикового профиля а-воздух; б –аргон, в –гелий, з- вакуум/ Influence of the composition of the filling gas at profile temperature: а - air; б –argon; з - gelium, д - vacuum.

Как видно из полученных результатов наилучшими теплоизоляционными свойствами обладают металлопластиковые окна стеклопакеты которых заполнены вакуумом (рис.7 д). Температура на поверхности стекла составляет 18.5 °С, т.е падение температуры составляет всего 1.5 °С и это при температуре внешней среды – 40 °С.

При заполнении гелием температура во внутренних помещения составляет 14.3 °С. Тогда как при заполнении воздухом и аргоном она приблизительно одинакова 14.9 °С и 15.0 °С.

Анализ теплового потока рис.8 показывает, что в пределах замкнутых полостей (камер) тепло распространяется преимущественно от внутренних частей к наружным при отсутствии теплового потока в поперечном направлении.

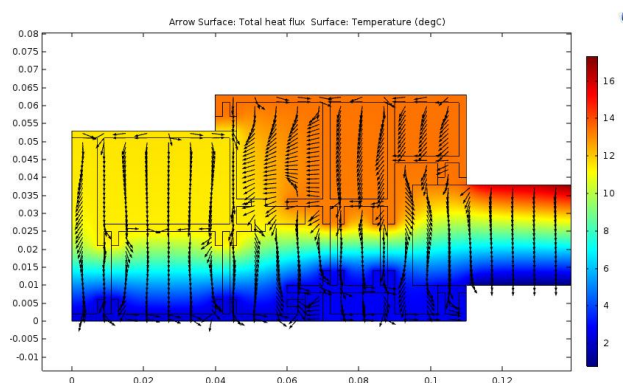


Рис. 8. Тепловой поток в профиле окна при температуре внешней среды -40 °С./ The heat flow in the window profile at ambient temperature -40 °С.

Анализ температурных полей внутри металлопластиковых окон показал, что металлические армирующие вставки (алюминий, сталь) находящиеся в закрытых камерах помимо упрочняющей функции, играют роль своеобразных аккумуляторов тепла, которые препятствуют быстрому снижению температуры в раме окна.

В заключении необходимо отметить, что преимуществом использования расчетных методов моделирования тепловых процессов является

возможность оценить термосопротивление окон, которые «пока еще» (!) не используются на практике.

### Результаты

Результаты проведенного компьютерного моделирования показали возможности использования расчетного пакета междисциплинарных исследований COMSOL Multiphysics при анализе энергоэффективности использования современных металлопластиковых окон. Расчетная программа в виде отдельного приложения может быть использована на объектах гражданского строительства и при разработке новых высокоэффективных строительных конструкций и сооружений.

### Научная новизна и практическая ценность

Установлено, что наиболее высокой энергоэффективностью из рассмотренных в данной работе обладают 3-х камерные металлопластиковые окна стеклопакеты которых заполнены вакуумом (откачен воздух). Чем выше степень откачки, тем, по-видимому, будет меньше потерь на теплопередачу тепла.

### Выводы

1. Проанализирована возможность использования пакета COMSOL Multiphysics для анализа тепловых процессов и энергоэффективности металлопластиковых окон.
2. На основании выполненных расчетов установлено, что наиболее высокой энергоэффективностью обладают 3-х камерные металлопластиковые окна с двойным стеклопакетом заполненным воздухом.
3. Использование металлопластиковых окон позволяет снизить падение температуры во внутренних помещениях с 10 °С до 1.5 °С при температуре окружающей среды – 40°С.
4. Расчетными методами показано, что в перспективе следует стремиться использовать двойные оконные стеклопакеты из которых удален воздух, что способно значительно повысить энергоэффективность металлопластиковых окон.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зайцева И. Современные двери и окна. Новейшие материалы и технологии работ. Серия: Библиотека домашнего мастера. - Режим доступу: [http://bookz.ru/authors/irina-zaiceva/sovremen\\_324.html](http://bookz.ru/authors/irina-zaiceva/sovremen_324.html)
2. Каземиров Н. Окна из металлопластика. – Режим доступу: [http://www.e-reading.club/bookreader.php/140963/Kazimirov-Okna\\_iz\\_metalloplastika.pdf](http://www.e-reading.club/bookreader.php/140963/Kazimirov-Okna_iz_metalloplastika.pdf)
3. Тупицына А.И. Методы компьютерного моделирования физических процессов и сложных систем - : Санкт-Петербург. Университет ИТМО, 2014. - 48 с.
4. Ашихмин В.Н., Гитман М.Б., Келлер И.Э., Наймарк О.Б., Столбов В.Ю. и др. Введение в математическое моделирование. М.: Логос, 2007.
5. <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
6. <https://www.comsol.com/model/window-and-glazing-thermal-performances-16075>
7. European Committee for Standardization, ISO 10077-2:2012, Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames, 2012.

**REFERENCES**

1. Zaytseva I. *Sovremennyye dveri i okna. Noveyshiye materialy i tekhnologii rabot. Seriya: Biblioteka domashnego мастера.*[Modern doors and windows. The latest materials and technologies. Series: DIY Library]. Available at: [http://bookz.ru/authors/irina-zaiceva/sovremen\\_324.html](http://bookz.ru/authors/irina-zaiceva/sovremen_324.html) (in Russian).
2. Kazemirov N. *Okna iz metalloplastika.*[ Windows made of metal plastic]. Available at: [http://www.e-reading.club/bookreader.php/140963/Kazimirov-Okna\\_iz\\_metalloplastika.pdf](http://www.e-reading.club/bookreader.php/140963/Kazimirov-Okna_iz_metalloplastika.pdf)
3. Tupitsyna A.I. *Metody komp'yuternogo modelirovaniya fizicheskikh protsessov i slozhnykh sistem* [Methods of computer modeling of physical processes and complex systems]. Saint-Petersburg, Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2014. 48 p. (in Russian).
4. Ashikhmin V.N., Gitman M.B., Keller I.E., Naymark O.B., Stolbov V.YU. i dr. *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye.* [Introduction to mathematical modeling]. Moscow: Logos, 2007, 440 p. Available at: <https://www.ozon.ru/context/detail/id/3311409/> (in Russian).
5. <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
6. <https://www.comsol.com/model/window-and-glazing-thermal-performances-16075>
7. European Committee for Standardization, ISO 10077-2:2012, Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames, 2012.

*Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. В.Н. Сидорцом (Україна), д-ром.техн.наук. Т.М.Лабур. (Україна).*