

УДК 691.6

С.С. Голубев

ФГБОУ ВПО «МГСУ»

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА
В СТЕКЛОПАКЕТЕ С УЧЕТОМ ЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Представлены результаты численного моделирования сопряженной задачи сложного теплообмена в однокамерном стеклопакете с учетом его деформирования вследствие отрицательного избыточного давления в межстекольном пространстве. Исследовано влияние степени деформации стекол в стеклопакете на его теплотехнические характеристики и режим течения газа в камере. Описан метод оценки приведенного сопротивления теплопередаче стеклопакета.

Ключевые слова: приведенное сопротивление теплопередаче, сопряженный теплообмен, эффект линзы, тепловой поток, естественная конвекция, многоячеистый режим.

Во время производства стеклопакетов заполняют осушенным воздухом и герметизируют. Внутри стеклопакета создается замкнутая среда с тем давлением и температурой, которые были в месте производства на момент герметизации. В дальнейшем, при хранении, транспортировке и эксплуатации стеклопакета, температура и давление окружающей среды изменяются [1]. Изменение наружной температуры влечет за собой изменение внутренней температуры газа в стеклопакете и атмосферного давления снаружи, создает разницу давлений, которая воздействует на стекла стеклопакета и деформирует их (рис. 1). Так, согласно определениям европейских нормативных документов (DIN 1055 Воздействия на сооружения), под климатической нагрузкой, действующей на стеклопакет, понимается положительное или отрицательное избыточное давление (по сравнению с атмосферным), возникающее во внутренней герметичной камере при изменении атмосферного давления и температуры наружного воздуха.

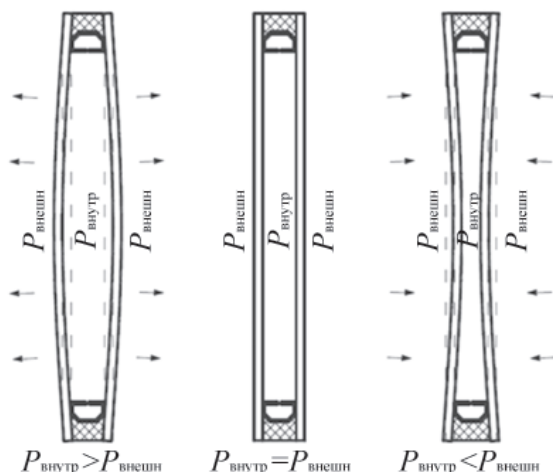


Рис. 1. Деформации стеклопакета под действием климатических нагрузок [1]

В зимний период при низких температурах стекла в стеклопакете прогибаются внутрь (см. рис. 1, слева), проявляется эффект линзы. Изменение геометрии стеклопакета приводит к понижению его теплотехнических качеств. Этот эффект можно наблюдать на тепловизионных снимках ограждающих конструкций (рис. 2).

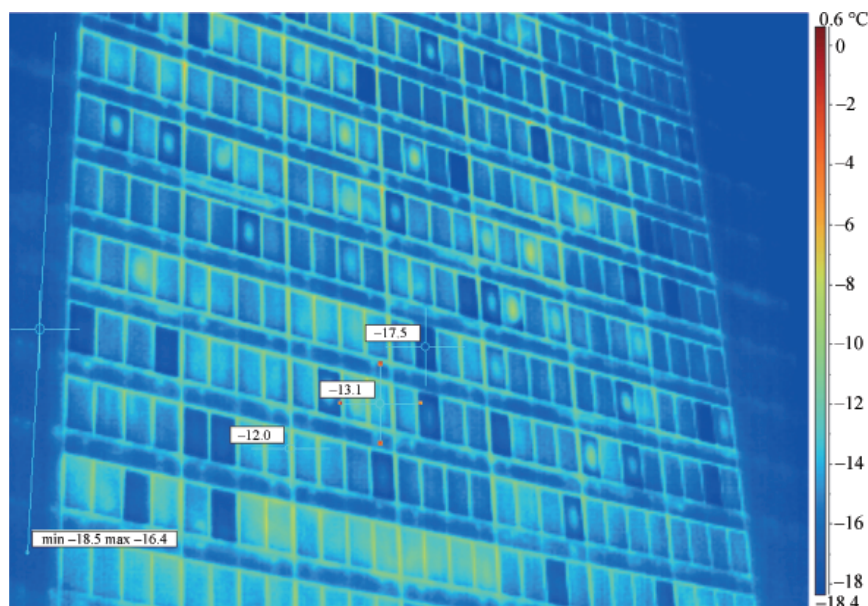


Рис. 2. Тепловизионный снимок фасада высотного здания. Эффект линзы проявляется в виде светлых пятен повышенной температуры в центре стеклопакетов

Для исследования рассматриваемого эффекта выбран однокамерный стеклопакет, с внутренним низкоэмиссионным стеклом ($\epsilon = 0,05$), камера шириной 20 мм заполнена аргоном, дистанционная рамка выполнена из полипропилена. Для расчета задачи в двумерной постановке высота стеклопакета принята равной 1300 мм.

Физическая и математическая постановка задачи аналогична [2]. Нужно отметить, что задачи такого типа (как сопряженные, так и несопряженные) без учета деформации стекол рассматривались, например, в [3—11]. Граничные условия на поверхности стекол выбирались согласно СП 23-101—2004 «Проектирование тепловой защиты зданий», на торцах стеклопакета $\partial t / \partial n = 0$. Задача решалась при различных величинах прогиба f центральных точек стекол. Сопряженная задача сложного теплообмена в однокамерном стеклопакете решалась методом контрольных объемов в гидро-газодинамическом пакете ANSYS FLUENT. Результаты вычисления теплотехнических характеристик стеклопакета представлены на рис. 3—5 и сведены в таблицу.

Для оценки теплотехнических качеств стеклопакета представляют интерес не только локальные значения температур и тепловых потоков на поверхности стекол в зависимости от высоты, но и интегральные значения, т.е. осредненные по высоте. Вычисление нормативной характеристики стеклопакета — приведенного сопротивления теплопередаче производилось по формуле

$$R_0 = \frac{\Delta t}{q^r},$$

где Δt — перепад температур между внутренним и наружным воздухом согласно СП 23-101—2004 «Проектирование тепловой защиты зданий»; q^r — осредненный по высоте суммарный тепловой поток на наружной поверхности стеклопакета, вычисленный по формуле

$$q^r = \frac{\int_0^H q(y) dy}{H}.$$

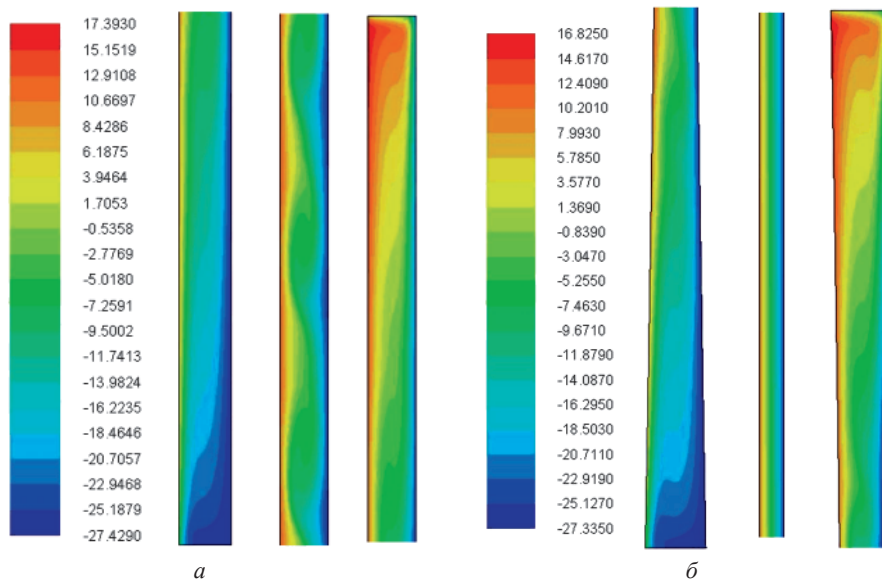


Рис. 3. Распределение температуры в прослойке стеклопакета (в нижней части — слева, средней части — в центре, в верхней части — справа) при величине прогиба центральной части стекол $f=0$ мм (а) и $f=6$ мм (б)

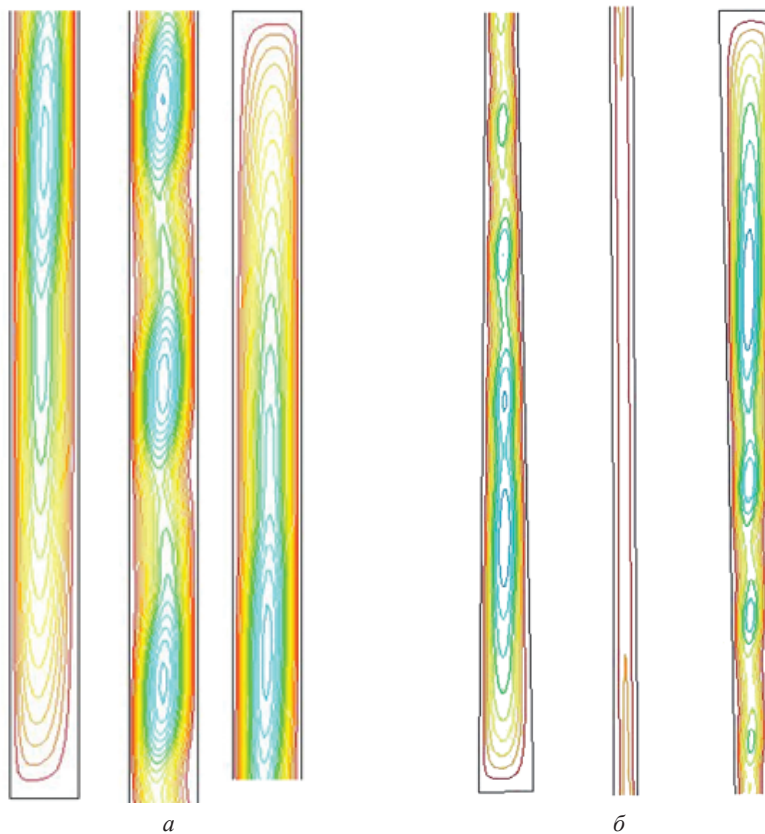


Рис. 4. Линии тока в воздушной прослойке (в нижней части — слева, средней части — в центре, в верхней части — справа) стеклопакета при $f=0$ мм (а), $f=6$ мм (б)

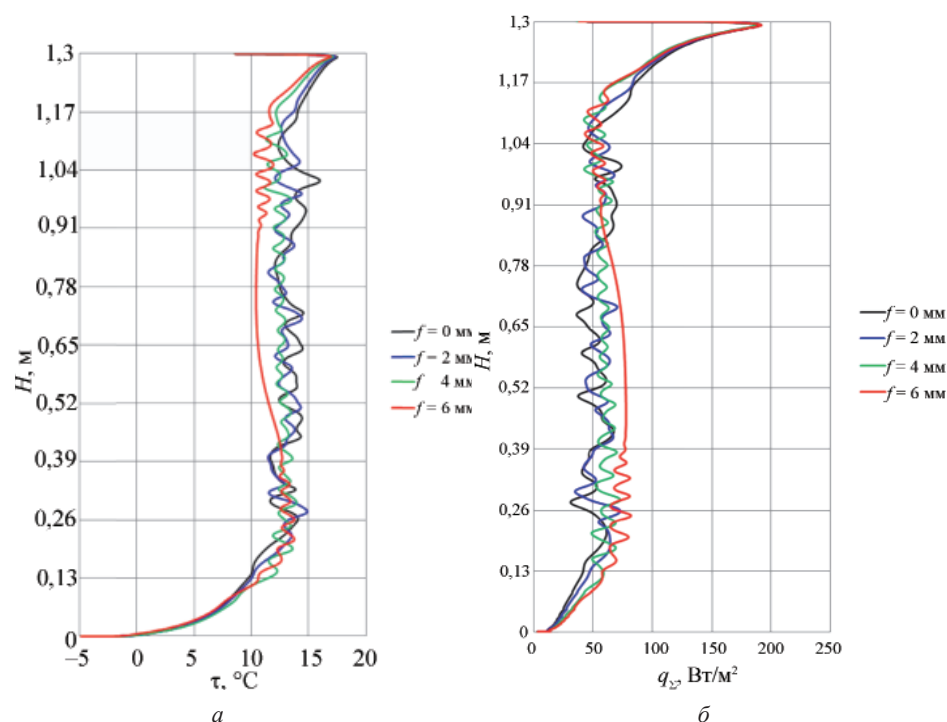


Рис. 5. Распределение температуры по высоте внутренней поверхности стеклопакета (а) и распределение суммарного теплового потока по внешней поверхности стеклопакета (б) при различных величинах прогиба стекол

Интегральные значения температур и тепловых потоков на поверхности исследуемого стеклопакета в зависимости от степени деформации приведены в таблице.

Интегральные величины температур и тепловых потоков на поверхности стеклопакета при различных величинах прогиба

f , мм	$\tau_{\text{в}}$, °C	$\tau_{\text{н}}$, °C	$q_{\text{H}_{\Sigma\text{cp}}}$, Вт/м ²	$q_{\text{Hr}_{\text{cp}}}$, Вт/м ²	$q_{\text{Hc}_{\text{cp}}}$, Вт/м ²	R_0 , м ² °C/Вт
0	12,68	-25,46	58,54	9,04	49,50	0,82
1	12,61	-25,43	59,04	9,01	50,03	0,81
2	12,49	-25,39	60	8,97	51,03	0,80
3	12,4	-25,35	60,88	8,94	51,94	0,79
4	12,22	-25,3	62,2	8,88	53,32	0,77
5	11,95	-25,2	64,47	8,78	55,69	0,74
6	11,23	-24,95	70,12	8,53	61,59	0,68

В таблице f — величина прогиба стекла в центральной части; $\tau_{\text{н}}$ — средняя температура наружной поверхности стеклопакета; $\tau_{\text{в}}$ — средняя температура внутренней поверхности стеклопакета; $q_{\text{H}_{\Sigma\text{cp}}}$ — среднее значение суммарного теплового потока на наружной поверхности стеклопакета; $q_{\text{Hr}_{\text{cp}}}$ — среднее значение радиационной составляющей теплового потока на наружной поверхности стеклопакета; $q_{\text{Hc}_{\text{cp}}}$ — среднее значение конвективной составляющей теплового потока на наружной поверхности стеклопакета; R_0 — приведенное сопротивление теплопередаче стеклопакета.

Полученные результаты показывают, что с увеличением прогиба стекол температура внутреннего стекла понижается с 12,68 до 11,23 °С, температура наружного стекла повышается с –25,46 до –24,95 °С. Суммарный тепловой поток также повышается за счет увеличения значения конвективной составляющей, при этом радиационная составляющая потока практически не меняется. Приведенное сопротивление теплопередаче стеклопакета значительно уменьшается с 0,82 до 0,64 м²·°С/Вт. Возникающий в прослойке многослойный режим течения газа с увеличением прогиба стекол становится устойчивее, однако при достижении расстояния между центрами стекол, равного половине ширины воздушной прослойки, характер течения газа в верхней и нижней третях (по высоте) прослойки остается многослойным, а в средней трети такого эффекта не возникает. Это хорошо видно на рис. 4 и на графиках (см. рис. 5).

Библиографический список

1. Стратий П.В., Борискина И.В., Плотников А.А. Климатическая нагрузка на стеклопакеты // Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 262—267.
2. Варпаев В.Н., Голубев С.С. Сравнение точного и приближенного учета теплового излучения границ при численном решении сопряженной задачи естественной конвекции в вертикальном слое оконных ограждений // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 129—136.
3. Варпаев В.Н. Конвекция и теплообмен в вертикальном слое с учетом излучения неизолированных стенок // Известия АН СССР, МЖГ. 1987. № 1. С. 25—30.
4. Варпаев В.Н., Китайцева Е.Х. Математическое моделирование задач внутренней аэродинамики и теплообмена зданий. М. : Изд-во СГА, 2008. 338 с.
5. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен / Б. Гебхарт, И. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Саммакия. В 2-х кн. : перевод с англ. М. : Мир, 1990. Т. 1 — 678 с. Т. 2 — 528 с.
6. Дроздов А.В., Савин В.К., Александров Ю.П. Теплообмен в светопрозрачных ограждающих конструкциях. М. : Стройиздат, 1979. 307 с.
7. Корепанов Е.В. Свободная конвекция в воздушных прослойках окон с двойным остеклением // Известия вузов. Строительство. 2005. № 2. С. 106—112.
8. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением : пер. с англ. Л. : Энергия, 1971. 296 с.
9. Тарунин Е.Л. Вычислительный эксперимент в задачах свободной конвекции. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1990. 228 с.
10. Густавсен А., Туэ Ю.В. Численное моделирование естественной конвекции в трехмерной воздушной полости с высокой вертикальной пропорцией и низкой горизонтальной пропорцией // Журнал строительной физики. 2007. 30(3). С. 217—240.
11. Двумерная вычислительная газодинамика и моделирование теплообмена в горизонтальном элементе оконной рамы с внутренними полостями / А. Густавсен, К. Колер, Д. Арасте, А. Далехау // АОИООК : сб. трудов. 2007. 113(1). С. 165—175.

Поступила в редакцию в октябре 2012 г.

Об авторе: Голубев Станислав Сергеевич — аспирант кафедры информатики и прикладной математики, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ccgol@mail.ru.

Для цитирования: Голубев С.С. Численное моделирование сложного теплообмена в стеклопакете с учетом его деформирования // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 47—52

S.S. Golubev

NUMERICAL MODELING OF CONJUGATE HEAT TRANSFER IN AN INSULATED GLASS UNIT (IGU) WITH ACCOUNT FOR ITS DEFORMATION

The results of numerical modeling of conjugate heat transfer in an IGU with account for its deformation caused by excessive negative pressure in the glazing cavity are presented in the article. The influence of the IGU glass pane deformation on thermal characteristics and gas flow regime within the cavity are studied. A method of assessment of reduced thermal resistance of IGU is provided.

The effects of different climatic impacts lead to the deformation of glasses within an IGU (and its vertical cavity, respectively). Deformation of glasses and vertical cavities reduces the thermal resistance of an IGU. A numerical simulation of conjugate heat transfer within an IGU was implemented as part of the research into this phenomenon. Calculations were performed in ANSYS FLUENT CFD package. Basic equations describing the conservation of mass, conservation of momentum (in the Boussinesq approximation), conservation of energy were solved. Also, the radiation of the cavity wall was taken into account. Vertical walls were considered as non-isothermal, while horizontal walls were adiabatic. Calculations were made for several patterns of glass deformations. Calculation results demonstrate that the heat flow over vertical walls intensifies as the distance between centres of IGU glasses is reduced. The temperature in the central area of the hot glass drops.

Key words: reduced thermal resistance, conjugate heat transfer, lens effect, specific heat flux, natural convection, multicellular flow.

References

1. Stratiy P.V., Boriskina I.V., Plotnikov A.A. Klimaticheskaya nagruzka na steklopakety [Climate Load on IGUs]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 2, pp. 262—267.
2. Varapaev V.N., Golubev S.S. Svravnenie tochnogo i priblizhennogo ucheta teplovogo izlucheniya granits pri chislenom reshenii sopryazhennoy zadachi estestvennoy konveksii v vertikal'nom sloe okonnnykh ograzhdeniy [Comparison of Exact and Approximate Analysis of Heat Radiation of Boundaries in the Numerical Solution of the Conjugate Problem of Natural Convection in a Vertical Layer of Windows]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 8, pp. 129—136.
3. Varapaev V.N. Konveksiya i teploobmen v vertikal'nom sloe s uchedom izlucheniya neizotermicheskikh stenok [Convection and Heat Transfer in a Vertical Layer with Account for the Radiation of Non-isothermal Walls]. *Izvestiya AN SSSR, MZhG* [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, Fluid Dynamics]. 1987, no. 1, pp. 25—30.
4. Varapaev V.N., Kitaytseva E.Kh. *Matematicheskoe modelirovanie zadach vnutrenney aerodinamiki i teploobmena zdaniy* [Mathematical Modeling of Problems of Internal Aerodynamics and Heat Transfer in Buildings]. Moscow, SGA Publ., 2008, 338 p.
5. Gebkhart B., Dzhaliyuriya I., Makhadzhan R., Sammakiya B. *Svobodnokonvektivnye techeniya, teplo- i massoobmen* [Free Convection Flows, Heat and Mass Transfer]. Moscow, Mir Publ., 1990, vol. 1, 678 p., vol. 2, 528 p.
6. Drozdov A.V., Savin V.K., Aleksandrov Yu.P. *Teploobmen v svetoprozrachnykh ograzhdayushchikh konstruktsiyakh* [Heat Transfer in Translucent Envelope Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 307 p.
7. Korepanov E.V. Svobodnaya konveksiya v vozdukhnykh prosloykakh okon s dvoynym ostekleniem [Free Convection within Air Gaps of Double Glazing Windows]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. [News of Institutions of Higher Education. Construction]. 2005, no. 2, pp. 106—112.
8. Sperrou E.M., Sess R.D. *Teploobmen izlucheniem* [Radiation-driven Heat Transfer]. Leningrad, Energiya Publ., 1971, 296 p.
9. Tarunin E.L. *Vychislitel'nyy eksperiment v zadachakh svobodnoy konveksii* [Computing Experiment in Problems of Free Convection]. Irkutsk University Publ., 1990, 228 p.
10. Gustavsen A., Tue Yu.V. Chislennoe modelirovanie estestvennoy konveksii v trekhmernoy vozduшной polosti s vysokoy vertikal'noy proporsiey i nizkoy gorizont'al'noy proporsiey [Numerical Simulation of Natural Convection in Three-dimensional Air Cavities with a High Vertical Ratio and a Low Horizontal Ratio]. *Zhurnal stroitel'noy fiziki* [Journal of Building Physics]. 2007, no. 30(3), pp. 217—240.
11. Gustavsen A., Koler K., Araste D., Dalekhau A. Dvumernaya vychislitel'naya gazodinamika i modelirovanie teploobmena v gorizont'al'nom elemente okonnoy ramy s vnutrennimi polostyami [Two-dimensional Computational Fluid Dynamics and Modeling of Heat Transfer in a Horizontal Element of a Window Frame with Internal Cavities]. *ASHRAE works*. 2007, no. 113(1), pp. 165—175.

About the author: **Golubev Stanislav Sergeevich** — postgraduate student, Department of Informatics and Applied Mathematics, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ccgol@mail.ru.

For citation: Golubev S.S. Chislennoe modelirovanie slozhnogo teploobmena v steklopakete s uchedom ego deformirovaniya [Numerical Modeling of Conjugate Heat Transfer in an Insulated Glass Unit (IGU) with Account for Its Deformation]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012, no. 12, pp. 47—52.