Аграрный научный журнал. 2022. № 7. С. 93–97.
Agrarian Scientific Journal. 2022;(7):93–97.

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научная статья
УДК 692
doi: 10.28983/asj.y2022i7pp93-97

Влияние конвекции воздуха внутри стеклопакета на теплопотери через оконные конструкции

Андрей Константинович Аксенов, Иван Константинович Коцкий
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия
e-mail: akaksenov@mail.ru

Аннотация. В работе разработана физико-математическая модель конвективного движения воздушных слоев между стеклами оконного стеклопакета. Проведенные исследования и анализ теплогидродинамических процессов в оконном стеклопакете позволили получить зависимости для выбора оптимального расстояния между стеклами и при необходимости делать выбор между однокамерным или многокамерным оконным стеклопакетами при остеклении аграрных построек.. Представлены экспериментальные исследования температурного режима оконных стеклопакетов в натурных условиях, а также с использованием специальной термокамеры. Полученные расчетные зависимости можно использовать при выборе и проектировании конструкции энергоэффективных световых проемов как для сооружений аграрного производства, так и для жилых зданий.

Ключевые слова: остекление аграрных построек; энергосбережение; оконная ограждающая конструкция; стеклопакет; свободная конвекция; необратимый термодинамический процесс.

Для цитирования: Аксенов А. К., Коцкий И. К. Влияние конвекции воздуха внутри стеклопакета на теплопотери через оконные конструкции // Аграрный научный журнал. 2022. № 7. С. 93–97. http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i7pp93-97.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Influence of air convection inside a double-glazed window on heat loss through window structures

Andrey K. Aksenov, Ivan K. Kotskiy
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
e-mail: akaksenov@mail.ru.

Abstract. In the article, a physical and mathematical model of the convective movement of air layers between the panes of a double-glazed window has been developed. The conducted studies and analysis of thermohydrodynamic processes in a window pane made it possible to obtain dependencies for choosing the optimal distance between panes and, if necessary, to make a choice between single-chamber or multi-chamber window panes for glazing agricultural buildings. Experimental studies of the temperature regime of window panes in natural conditions are presented, as well as using a special heat chamber. The obtained calculated dependencies can be used in the selection and design of the design of energy-efficient light openings for both agricultural production facilities and residential buildings.

Keywords: glazing of agricultural buildings; energy saving; window enclosing structure; double-glazed window; free convection; irreversible thermodynamic process.

For citation: Aksenov A. K., Kotskiy I.K. Influence of air convection inside a double-glazed window on heat loss through window structures // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Sci-entific Journal. 2022;(7): 93–97. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i7pp93-97.

Введение. Выбор высокоэффективного остекления оконных конструкций, как для аграрных производственных сооружений, так и для жилых зданий в сельскохозяйственных районах является важной задачей, с которой сталкиваются проектировщики при разработке новых современных сооружений. Энергопотери через стеклянные наружные ограждения в большинстве случаев составляют более 80 % от всех энергозатрат на отопление всего здания [1, 2].

В настоящее время основной конструкцией оконных блоков является металлопластиковая рама с герметичными стеклопакетами.

Выбор оптимальных геометрических размеров оконных стеклопакетов в зависимости от климатических условий района строительства в основном происходит интуитивно и основывается на предыдущих практиках, что приводит к ошибочным решениям. Для обоснованного правильного выбора необходимо детально понимать физические процессы, которые определяют теплоперенос через стеклянную конструкцию [3, 4].

Методика исследований. В настоящей работе разработана физико-математическая модель конвективного движения воздушных слоев между стеклами оконного стеклопакета, которое в основном определяет величину термического сопротивления всей конструкции.

Проведенные исследования и анализ теплогидродинамических процессов в оконном стеклопакете позволили получить зависимости для выбора оптимального расстояния между стеклами и при необходимости делать выбор для применения однокамерного или многокамерных оконных стеклопакетов.

С помощью тепловизора были проведены экспериментальные исследования температурного режима оконных стеклопакетов в натурных условиях, также для исследования использовалась специальная термокамера.

Полученные расчетные зависимости можно использовать при выборе и проектировании конструкции энергоэффективных световых проемов как для сооружений аграрного производства, так и для жилых зданий.

В работе представлена физико-математическая модель гидродинамики движения воздушных слоев внутри оконного стеклопакета. Решение основывалось на законах термодинамики необратимых процессов, одновременно использовался вариационный принцип для нахождения искомых функций, аналитически выражающих поля скоростей и температуры потока в пограничных слоях воздушных потоков в ограниченном пространстве между стекол.

По результатам проведенного эксперимента на лабораторной установке и в натурных испытаниях был найден оптимальный размер расстояния между стеклами, отвечающий требованиям энергоэффективности. В данной работе рассматривались исключительно внутренние теплогидравлические процессы между стекол, которые в основном и

© Аксенов А. К., Коцкий И. К., 2022

определяют термическое сопротивление всей конструкции, пренебрегая теплопроводностью стекол, которая на порядок превышает теплопроводность воздушного слоя между стекол.

Результаты исследований. В основу решения положены законы термодинамики необратимых процессов, одновременно используется вариационный принцип для нахождения искомых функций, аналитически определяющих поля скоростей и температуры потока в пограничных слоях воздушного зазора между стекол оконного проема.

Внутри стеклопакета на поток теплопроводности через воздушный зазор между стеклами накладывается конвективный процесс. Так, у наружного стекла возникает свободно конвективный поток, направленный сверху вниз, а у внутреннего стекла – поток воздуха, направленный снизу вверх. Эти потоки соприкасаются приблизительно в центральной плоскости между стеклами.

Рассмотрим процесс свободно конвективного движения воздуха между двумя стеклами оконного стеклопакета (рис. 1). Внутреннее стекло имеет температуру t_{w1},а наружное t_{w2}. Температура воздуха в центральном сечении между стекол одинакова по высоте и равна $t_0 =(t_{w1}+ t_{w2})/2$. Полагая $t_{w1}>t_0$, а $t_{w2}<t_0$, одновременно будем полагать, что t_0 – температура воздуха в невозмущенном потоке.

Примем симметричный характер движения этих встречных потоков.

Если рассматривать гидродинамику движения воздуха внутри стеклопакета, то скорость частиц у поверхности стекла равна нулю, далее она возрастает, достигает максимального значения и в плоскости соприкосновения двух встречных потоков становится равной нулю. Торможение двух потоков, как раз обуславливает, что в настоящее время расстояние между стеклами стараются делать сравнительно небольшим 8–20 мм.

Выбор оптимальной толщины зависит от геометрических размеров оконного остекления, в частности от высоты и от температурного диапазона наружного и внутреннего воздуха.

По мере приближения к внутреннему стеклу температура слоев восходящего потока воздуха повышается, а плотность воздуха соответственно уменьшается. Одновременно приближаясь к поверхности наружного стекла, температура слоев нисходящего потока воздуха между понижается, а плотность его соответственно увеличивается.

В результате полученного движения теплых и охлажденных слоев потока около внутреннего и наружного стекол образуются гидродинамические и тепловые пограничные слои $\delta(x)$. Скорость $W_x(y)$ изменяется от нулевого значения на стенке до максимального $W_m(y_m)$, а затем снова уменьшается до нуля на внешней границе $\delta(x)$. Температура воздуха уменьшается от $t = t_w$ на поверхности стекла до значения t_0 в невозмущенных слоях воздушного зазора между стеклами при $y> \delta(x)$. Профили полей скоростей конвективных воздушных потоков и температуры представлены на рис. 1.

Зависимость плотности потока ρ от температуры примем линейной:

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\vartheta), \tag{1}$$

где $\vartheta = t - t_0$; ρ_0 – плотность воздуха при t_0; β – коэффициент объемного расширения воздуха.

Выделим в пограничном слое элементарный объем воздуха, ограниченный плоскостями AA_1 и BB_1, плоскостью стенки и параллельной плоскости CD на произвольном расстоянии от поверхности стекла. Ширину слоя в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа рис. 1, примем равной единице. Следовательно, величина выделенного объема равна

$$dV = (\delta - y)dx \cdot 1. \tag{2}$$

На произвольном расстоянии от поверхности стекла проведем параллельную ей плоскость CD. Сила трения F_{fr}, действующая в указанной плоскости на выделенный элемент, выражается формулой:

$$dF_{fr} = \tau dx \cdot 1, \tag{3}$$

где τ – напряжение сдвига или напряжение трения, в указанной плоскости.

Секундная работа трения будет равна произведению этой силы на скорость деформации жидкости в рассматриваемой плоскости:

$$dE_{fr} = \tau \frac{\partial w_x}{\partial y} dxdy \cdot 1. \tag{4}$$

Формула (4) выражает количество энергии, которое диссипируется, то есть переходит в тепловую энергию и рассеивается. Поток этой энергии направлен в сторону меньших значений температур к внешней границе пограничного слоя, т.е. в элемент C_1, D_1, B_1, A_1.

Секундное изменение плотности энергии элемента A_1, B_1, DC, вызванное диссипацией в плоскости CD, будет равно:

$$de_{fr} = \frac{\tau}{\delta - y} \frac{\partial w_x}{\partial y} dy. \tag{5}$$

Соответственно интегральная характеристика вязкостного трения во всем выделенном элементе AA_1BB_1 будет иметь следующий вид:

$$e_{fr} = \int_0^{\delta} \frac{\tau}{\delta - y} \frac{\partial w_x}{\partial y} dy. \tag{6}$$

© Аксенов А. К., Коцкий И. К., 2022

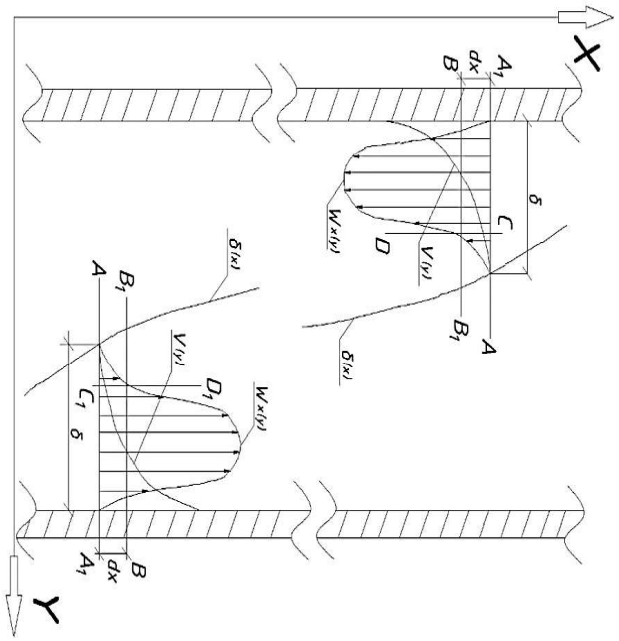


Рис. 1. Модель движения воздуха и образование пограничного слоя внутри стеклопакета оконного блока

где $w_m(x)$ – максимальная величина скорости в слое;

$\varphi(\eta)$ – искомая функция $\eta = \frac{y}{\delta}$.

Подставляя (8) в интеграл (7), получаем:

$$e_{fr} = \frac{\mu w_x^2}{\delta^2} \int_0^1 \frac{(\phi')^2}{1-\eta} d\eta, \quad (9)$$

где $\varphi' = \frac{d\varphi}{d\eta}$

Секундное изменение плотности потенциальной энергии выделенного элемента пограничного слоя будет определяться работой подъемных сил:

$$e_p = \frac{1}{\delta} g \int_0^{\delta} (\rho - \rho_0) w_x dy = -g\rho_0 w_m \beta \vartheta_m \int_0^1 \varphi\psi d\eta, \quad (10)$$

где $\psi = \frac{\vartheta}{\vartheta_m}$;

$$\vartheta_m = t_{cm} - t_0.$$

Если пренебречь изменением кинетической энергии потока, то, следуя известному в механике принципу Гельмгольца, можно утверждать, что интеграл в установившемся процессе будет иметь минимум. Таким образом, поля физических величин для стационарных неравновесных состояний могут быть исследованы на основе экстремального принципа:

$$\int_0^1 (e_p + e_{fr}) d\eta. \quad (11)$$

С учетом выражений (9) и (10) будем иметь:

$$\int_0^1 \left(-a_1\varphi\psi + a_2 \frac{\varphi'^2}{1-\eta}\right) d\eta = \min, \quad (12)$$

где $a_1 = g\rho_0 w_m \beta \vartheta_m$,

© Аксенов А. К., Коцкий И. К., 2022

$$a_2 = \frac{\mu w_m^2}{\delta^2}.$$

Таким образом, задача о распределении скорости $w_x(y)$ в пограничном слое может быть сведена к задаче вариационного исчисления [1, 2, 3], а именно исследованию функционала (12) на экстремум при следующих граничных условиях:

$$1)\ w_x(0) = 0;\ 2)\ w_x(\delta) = 0;\ 3)\ \left.\frac{\partial w_x}{\partial y}\right|_{y=\delta} = 0;\ 4)\ \left.\frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2}\right|_{y=\delta} = \frac{q(\rho_{ст} - \rho_0)}{\mu}. \quad (13)$$

Решив экстремальную задачу формирования конвективного потока у внутреннего стекла, мы с успехом можем ее отнести и к нисходящему потоку у наружного стекла. Подробно математическое решение представлено в [2], где δ – толщина пограничного слоя, причем

$$w_m = \frac{\rho_0 g \beta \vartheta_m \delta^2}{200\mu}, \quad (14)$$

$\delta < 0{,}5\Delta$,
где Δ – расстояние между стеклами.

При $\delta = 0{,}5\Delta$ и $\delta > 0{,}5\Delta$ пограничный слой не растет, т.к. восходящий поток встречается с нисходящим. Скорость движения оздуха остается постоянной, причем один поток воздуха тормозится встречным.

$$\delta = 3{,}56\left(\frac{g\beta\vartheta_m}{vax}\right)^{-\frac{1}{4}}, \quad (15)$$

где a – коэффициент температуропроводности $a=\lambda/(C_p\rho)$;

$$\vartheta_m = t_{ст1} - t.$$

Получим:

$$\frac{\delta}{x} = 3{,}56(Gr_x Pr)^{-\frac{1}{4}}; \quad (16)$$

$$q = -\lambda\left(\frac{\partial \upsilon}{\partial y}\right)_{y=+0} = -\frac{\lambda}{\delta}\vartheta_m \psi_{\ \eta=+0},$$

где

$$\psi = \frac{\vartheta}{\vartheta_m}.$$

С другой стороны,

$$q = \alpha\vartheta_m.$$

Следовательно, выводится выражение для локального значения коэффициента теплоотдачи для плоской вертикальной поверхности стекла:

$$\alpha = 0{,}365\frac{\lambda}{x}(Gr_x Pr)^{\frac{1}{4}}. \quad (17)$$

Таким образом, применив законы теории физического подобия, среднее термическое сопротивление стеклопакета соответственно будет равно:

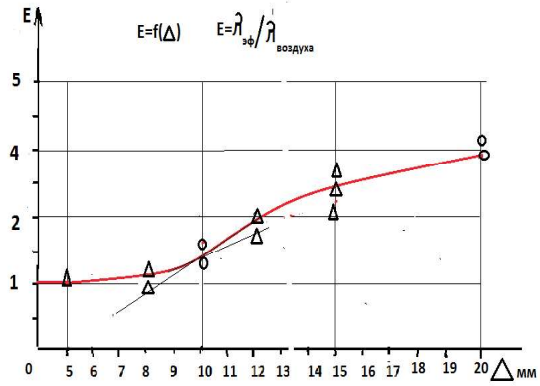
$$R_t = \frac{\Delta}{\lambda} - \frac{1}{0{,}042\frac{\lambda}{\Delta}}Gr_\Delta^{0{,}25} = \frac{\Delta}{\lambda}(1 - 0{,}042Gr_\Delta^{0{,}25}),\ (м^2К)/Вт. \quad (18)$$

где Gr_Δ – число Грасгофа. За определяющий геометрический параметр принята толщина воздушного зазора между стекол Δ.

Формула (18) хорошо согласуется с экспериментальными данными [3, 4], так как основана на основополагающих физических законах термодинамики необратимых процессов, которые в основном и определяют законы природы возникновения реального движения жидкости и газа.

Если рассматривать процесс передачи теплоты через оконный стеклопакет как процесс теплопроводности, то

© Аксенов А. К., Коцкий И. К., 2022



О – экспериментальные данные автора;

Δ – данные других исследователей [4–5].

Рис. 2. Зависимость коэффициента конвекцией $E_к$ от расстояния между стеклами Δ

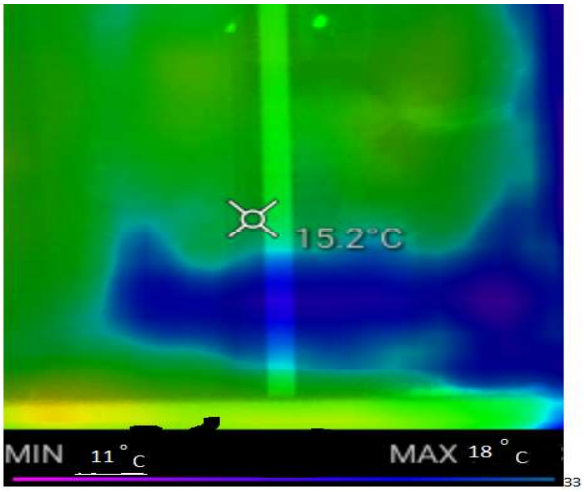


Рис. 3. Термограмма, снятая с внутренней стороны окна тепловизором наружная температура $t_н$ = -10⁰C; температура внутри помещения $t_{вн}$ =20 °C

вместо теплопроводности воздуха $\lambda_в$ можно ввести понятие эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$, тогда величина $E = \lambda_{эф}/\lambda_в$ будет определять: во сколько раз увеличивается тепловой поток за счет конвекции по сравнению с чистой теплопроводностью воздушного слоя, если бы он оставался неподвижным. Экспериментальные значения представлены на рис. 2.

Измерения температурного поля поверхности внутреннего и наружного стекол показали, что температура поверхности не одинакова по высоте окна, а именно температура в нижней части поверхность стекла на 7–8 % ниже центральной части (рис. 3). Эта зона распространяется до 30 см при высоте окна 2 м. Что объясняется формированием пограничного слоя. В нижней части у внутреннего стекла этот слой имеет малую толщину и практически весь объем занимает холодный поток от наружного стекла синий цвет , это приводит к тому, что температура поверхности стекла может быть ниже точки росы внутреннего воздуха в помещении, стекло запотевает и при низких температурах может замерзнуть, что не допустимо для нормального термовлажностного режима здания.

Заключение. Как показали исследования, при температурах наружного воздуха ниже 15 °C применение двух- и более камерных стеклопакетов увеличивает энергоэффективность конструкции на 25–30 % по сравнению с однокамерной конструкцией той же толщиной.

Таким образом, при межстекольном зазоре 20 мм конвекция уменьшает термическое сопротивление воздушного слоя более чем в три раза, а с увеличением расстояния между стекол относительная конвективная составляющая увеличивается. Как показывают расчеты и эксперимент, не целесообразно увеличивать расстояние между стеклами более чем Δ = 10/15 мм, а при расчетных температурах наружного воздуха ниже –15 °C рекомендуется устанавливать двойные, а при необходимости тройные стеклопакеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей к диссипативным структурам. М., 2002. 44 с.

2. Aksenov A. K. Variational method in the problem of convective heat transfer near the vertical plane of the outer building fence in terms of free air movement // SPb WOSCE 2017 «Business Technologies for Sustainable Urban Development" 0042(2018).

3. Abedin M., Tsuji T., Hattori Y. Direct numerical simulation for a time-developing natural-convection boundary layer along a vertical plate // Int. J. Heat Mass Transfer. (2009). Vol. 52. No. 19-20. P. 4525–4534.

4. Hattori Y., Tsuji T., Nagano Y., Tanaka N.. Turbulence characteristics of natural-convection boundary layer in air along a vertical plate heated at high temperatures // International Journal of Heat and Fluid. 2006. 27. 3. 445–455.

REFERENCES

1. Prigozhin I., Kondepudi D. Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures. Moscow, 2002. 44 p. (In Russ.)

2. Aksenov A. K. Variational method in the problem of convective heat transfer near the vertical plane of the outer building fence in terms of free air movement. *SPb WOSCE 2017 "Business Technologies for Sustainable Urban Development"*.2018: 0042.

3. Abedin M., Tsuji T., Hattori Y. Direct numerical simulation for a time-developing natural-convection boundary layer along a vertical plate. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2009; 52; 19-20: 4525–4534.

4. Hattori Y., Tsuji T., Nagano Y., Tanaka N. Turbulence characteristics of natural-convection boundary layer in air along a vertical plate heated at high temperatures. *International Journal of Heat and Fluid*. 2006; 27; 3: 445–455.

Статья поступила в редакцию 11.02.2022; одобрена после рецензирования 28.02.2022; принята к публикации 05.03.2022.

The article was submitted 11.02.2022; approved after reviewing 28.02.2022; accepted for publication 05.03.2022.

© Аксенов А. К., Коцкий И. К., 2022