

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научная статья

УДК 697.3

doi: 10.28983/asj.y2023i7pp102-105

Исследование влияния угла наклона на термическое сопротивление стеклянных световых конструкций аграрных сооружений

Андрей Константинович Аксенов, Иван Константинович Коцкий

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

e-mail: akaksenov@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследований влияния угла наклона на термическое сопротивление стеклянных световых конструкций аграрных сооружений. Для экспериментальных исследований использовалась специальная холодильная камера, у которой одна из стен выполнена в виде стеклопакета. Камера наклонялась в сторону световой конструкции. С помощью тепломеров установленных на поверхности стекла замерялась величина теплового потока. Испытывались однокамерный двухкамерный стеклопакеты. На основании полученных экспериментальных данных предложена расчетная зависимость для определения тепловых потерь через наружные наклонные световые ограждения, включающие стеклопакеты.

Ключевые слова: наклонный стеклопакет; остекление аграрных сооружений; термическое сопротивление; стеклянные световые конструкции; теплопотери через наружные ограждения;

Для цитирования: Аксенов А. К., Коцкий И. К. Исследование влияния угла наклона на термическое сопротивление стеклянных световых конструкций аграрных сооружений // Аграрный научный журнал. 2023. № 7. С. 102–105. [http: 10.28983/asj.y2023i7pp102-105](http://10.28983/asj.y2023i7pp102-105).

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Study of the influence of the angle of inclination on the thermal resistance of glass light structures of agricultural buildings

Andrey K. Aksenov, Ivan K. Kotskiy

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

e-mail: akaksenov@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of studies of the influence of the angle of inclination on the thermal resistance of glass light structures of agricultural buildings. For experimental studies, a special refrigerating chamber was used, in which one of the walls is made in the form of a double-glazed window. The camera tilted towards the light structure. With the help of heat meters installed on the surface of the glass, the value of the heat flux was measured. Both single-chamber and double-glazed windows were tested. Based on the experimental data obtained, a calculated dependence is proposed for determining heat losses through external inclined light fences, including double-glazed windows.

Keywords: tilted double glazing; glazing of agricultural buildings; thermal resistance; glass light structures; heat loss through external fences.

For citation: Aksenov A. K., Kotskiy I. K. Study of the influence of the angle of inclination on the thermal resistance of glass light structures of agricultural buildings. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(7):102–105. (In Russ.). [http: 10.28983/asj.y2023i7pp102-105](http://10.28983/asj.y2023i7pp102-105).

Введение. Тепловые потери через стеклянные конструкции в сельскохозяйственных сооружениях для растениеводства составляют до 90 % от всех тепловых потерь через наружные ограждения. Так как солнечный свет, который крайне необходим для выращивания большин-





ства растительных культур, поступает через потолочные (крышные) конструкции, корректный теплотехнический расчет таких конструкций является весьма актуальной задачей.

В газовой прослойке между стеклами воздух или его заменитель (аргон, ксенон, криптон) не находится в покое, а непрерывно движется (у наружного стекла опускается вниз, а у более теплого внутреннего стекла поднимается вверх), причем холодный поток под углом к плоскости стекла под действием гравитационных сил устремляется на внутреннее стекло, одновременно теплый конвективный поток воздуха направится от внутреннего стекла к наружному. С увеличением угла наклона к вертикальной плоскости процесс конвективного взаимного перемещения теплых и холодных струй от внутреннего к наружному стеклу увеличивается.

В настоящее время расчетные зависимости, учитывающие влияние угла наклона стеклопакета на величину теплопотерь, практически отсутствуют [1, 2]. Большинство данных и правил, приведенных в СП, относятся к световым конструкциям, располагаемым вертикально. Для наклонных потолочных и крышных световых конструкций учитывается увеличение тепловых потерь, связанных с применением более массивных несущих переплетов, которые изготавливаются из более мощных металлических изделий.

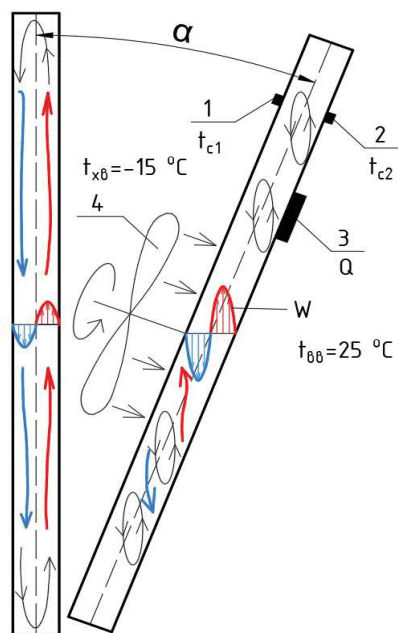
Методика исследований. В работе приведены результаты исследований по влиянию угла наклона (от нуля до 90° к вертикальной плоскости световой конструкции) на величину эквивалентной теплопроводности воздушной прослойки стеклопакета. В эксперименте использовали одно- и двухкамерный стеклопакеты с параметрами соответственно 4–20–4 и 4–10–4, установленные в качестве одной из наружных стен холодильной камеры. В холодильной камере поддерживалась постоянная отрицательная температура, для серии одного эксперимента, от -15 до -20°C , что соответствовало температуре наружного воздуха в зимний период времени. Камера находилась в лабораторном помещении, где поддерживалась постоянная температура 25°C , соответствующая температуре внутреннего воздуха. Холодильная камера наклонялась в сторону световой конструкции под углом от 0 до 90° по отношению к вертикальной плоскости (рис. 1).

В процессе выполнения эксперимента выполнялись следующие измерения.

Для равномерного распределения температуры во всем объеме внутри камеры был установлен вентилятор, который создавал поток воздуха внутри холодильной камеры, что имитировало ветер 3 м/с с наружной стороны здания. Скорость ветра изменялась оборотами двигателя вентилятора с помощью частотного регулятора.

Температуру наружной поверхности стекол со стороны теплого и холодного объемов воздуха измеряли поверхностными термопарами t_{c1} и t_{c2} . На поверхности стекол со стороны теплого помещения были установлены два тепломера (один на однокамерном стеклопакете другой на двухкамерном). По показаниям электронных тепломеров определяли величину теплового потока через стеклопакеты при изменении их углов наклона к вертикали от 0 до 90° с шагом 15° .

Как показали экспериментальные исследования, представленные на рис. 2, угол наклона α в значительной степени уменьшает термическое сопротивление воздушной прослойки стеклопакета, а следовательно, увеличивает теплопотери через наклонные световые конструкции. Для однокамерных стеклопакетов это увеличение составляет более 30% . Тепловые потери через двухкамерный стеклопакет увеличиваются примерно на 20% .



- 1 – термопара со стороны холодильной камеры, t_{c1} ;
- 2 – термопара со стороны помещения, t_{c2} ;
- 3 – тепломер для измерения величины теплового потока, Q ;
- 4 – вентилятор, $v=3\text{ м/с}$

Рис. 1. Влияние угла наклона α от вертикали светового проема на характер конвективных потоков воздуха внутри стеклопакета



В настоящее время для расчета теплового потока Q_0 Вт через вертикальную воздушную прослойку используют понятие эквивалентной теплопроводности $\lambda_{\text{эк}}$ [3]:

$$\lambda_{\text{эк}} = \lambda_{\text{в}} \varepsilon_{\text{к}},$$

где $\lambda_{\text{в}}$ – теплопроводность воздуха, Вт/мК; $\varepsilon_{\text{к}}$ – коэффициент конвекции.

Коэффициент конвекции показывает во сколько раз увеличивается тепловой поток за счет конвекции между стеклами по сравнению с отдельным тепловым потоком теплопроводностью, если бы воздух внутри стеклопакета оставался неподвижным.

$$Q_0 = \lambda_{\text{эк}} \frac{t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}}{\delta} F,$$

где δ – расстояние между стеклами, м; F – площадь поверхности окна, м²; $(t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}})$ – разность температур поверхности стекол стеклопакета (термическим сопротивлением стекол пренебрегаем).

С другой стороны:

$$\lambda_{\text{эк}} = \frac{Q_0 \delta}{F \Delta t}.$$

Если $\lambda_{\text{эк}}$ разделить на теплопроводность газа (воздуха), которым заполнен стеклопакет, получим коэффициент конвекции, увеличивающий теплообмен:

$$\varepsilon_{\text{к}} = \lambda_{\text{эк}} / \lambda_{\text{в}}.$$

Коэффициент конвекции является функцией чисел физического подобия

$$\varepsilon_{\text{к}} = f(\text{Gr}, \text{Pr}).$$

Число Грасгофа

$$\text{Gr} = \frac{g b \delta^3 \Delta t}{\nu^2},$$

где Gr – ускорение свободного падения; $g = 9,81$, м/с²; b – температурный коэффициент объемного расширения воздуха; $b = \frac{1}{t_{\text{ср}} + 273}$, 1/К; $t_{\text{ср}}$ – средняя температура газа (воздуха) в межстекольном пространстве.

$$\Delta t = t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

δ – характерный линейный размер системы в рассматриваемом случае – расстояние между стеклами, м; ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с.

Число Прандтля

$$\text{Pr} = \frac{\lambda \rho c_p}{\nu},$$

где λ – теплопроводность воздуха, Вт/мК; ρ – плотность воздуха кг/м³; c_p – изобарная теплоемкость воздуха Вт/кгК.

Заключение. На основании полученных экспериментальных данных, величина теплового потока через наклонный стеклопакет оконного проема в зависимости от угла наклона α к вертикали аппроксимируется выражением

$$Q_{\alpha}^I = Q_0 (1 + b \sin \alpha),$$

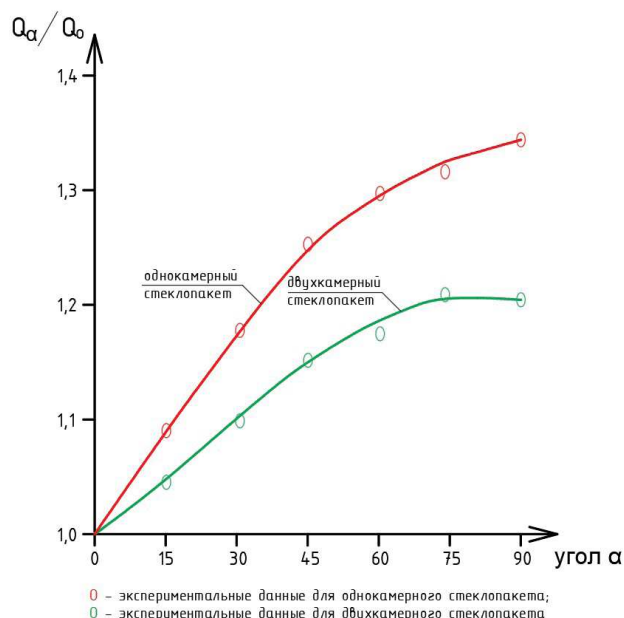


Рис. 2. Экспериментальные данные по величине тепловых потерь через стеклопакеты в зависимости от угла наклона α светового проема к вертикальной оси: Q_0 – тепловой поток через вертикальный стеклопакет; Q_{α} – тепловой поток через наклонный стеклопакет

для однокамерного стеклопакета $b = 0,35$;

для двухкамерного стеклопакета $b = 0,21$.

Ранее авторами было получена зависимость [4] для расчета термического сопротивления вертикального стеклопакета, вывод формулы основывался на законах термодинамики необратимых процессов [5, 6].

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda} - \frac{1}{22\frac{\lambda}{\delta}} Gr_{\delta}^{0,25} = \frac{\delta}{\lambda} (1 - 0,045 Gr_{\delta}^{0,25}), \text{ м}^2\text{К/Вт.}$$

где δ – характерный линейный размер системы в рассматриваемом случае – расстояние между стеклами, м; Gr_{δ} – число Грасгофа, посчитанное по определяющему геометрическому параметру, в данном случае это расстояние между стеклами δ .

Соответственно тепловой поток через 1 м² стеклопакета, расположенного под углом α к вертикальной плоскости, примет следующий вид:

$$q_{\alpha} = \frac{\lambda(1+b\sin\alpha)(t_{ct1}-t_{ct2})}{\delta(1-0,045Gr_{\delta}^{0,25})}, \text{ Вт/м}^2.$$

Полученное выражение можно использовать для расчета теплопотерь через наружные наклонные световые ограждения, состоящие из стеклопакетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 426.1325800.2020 Конструкции ограждающие светопрозрачные зданий и сооружений: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2021-07-01/ Министерство регионального развития Российской Федерации. М.: Минрегион России, 2020. 50 с.
2. ГОСТ EN 673–2016 Стекло и изделия из него. Методы определения тепловых характеристик. Метод расчета сопротивления теплопередаче: межгосударственный стандарт: дата введения 2018-01-03 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. М.: Стандартиформ, 2017. 14 с.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., 1977. 344 с.
4. Аксенов А.К., Коцкий И.К. Влияние конвекции воздуха внутри стеклопакета на теплопотери через оконные конструкции // Аграрный научный журнал. 2022. № 7. С. 93–97.
5. Prigozhin I., Kondepudi D. Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures. Moscow, 44 (2002).
6. 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).

REFERENCES

1. SP 426.1325800.2020 Structures enclosing translucent buildings and structures: national standard of the Russian Federation: introduction date 2021-07-01 / Ministry of Regional Development of the Russian Federation. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2020. 50 p.
2. GOCT EN 673–2016 Glass and glass products. Methods for determining thermal characteristics. Heat transfer resistance calculation method: interstate standard: introduction date 2018-01-03 / Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. M.: Standartinform, 2017. 14 p.
3. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Fundamentals of heat transfer. Moscow, 1977. 344 p. (In Russ.).
4. Aksenov A.K., Kotsky I.K. Influence of air convection inside a double-glazed window on heat loss through window structures. *The Agrarian scientific journal*. 2022; 7: 93-97. (In Russ.)
5. Prigozhin I., Kondepudi D. Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures. Moscow, 44 (2002).
6. 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).

Статья поступила в редакцию 12.02.2023; одобрена после рецензирования 20.03.2023; принята к публикации 30.03.2023.

The article was submitted 12.02.2023; approved after reviewing 20.03.2023; accepted for publication 30.03.2023.

