

УДК 536.3

DOI 10.25587/SVFU.2022.25.61.005

А. М. Тимофеев, Д. В. Харюзов

Расчет теплопередачи через ограждающую конструкцию с полупрозрачным экраном

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

E-mail: am.timofeev@s-vfu.ru; e-mail: dima_haruzov@mail.ru

Аннотация. Расчет тепlopоступлений через ограждения является важной частью задачи прогнозирования летнего теплового режима здания под прозрачным куполом, интерес к строительству которых в северных регионах возрос в последнее время. В работе рассмотрена относительно простая, пригодная для инженерных расчетов модель теплопередачи через ограждающую конструкцию с полупрозрачным экраном, позволяющую учесть парниковый эффект. Для верификации модели было проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных и получено их хорошее согласие, что подтверждает работоспособность предложенной модели. Показано, что наличие полупрозрачного экрана из-за парникового эффекта значительно изменяет температуру стены здания под куполом и величину теплового потока, откуда следует важность учета таких факторов, как оптические свойства экрана, температура небесного свода и других климатических факторов при расчете теплового режима купольных систем.

Ключевые слова: теплопередача, радиационный теплообмен, полупрозрачный экран, селективный, отражение, купольная система, тепловой режим, парниковый эффект, конвекция, тепловое сопротивление, математическое моделирование.

Для цитирования: Тимофеев, А. М. Расчет теплопередачи через ограждающую конструкцию с полупрозрачным экраном / А. М. Тимофеев, Д. В. Харюзов // Вестник СВФУ. 2022, №4(90). С. 40–47. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.25.61.005>

A. M. Timofeev, D. V. Khariuzov

Calculation of heat transfer through the building envelope with a translucent screen

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

E-mail: am.timofeev@s-vfu.ru; e-mail: dima_haruzov@mail.ru

Abstract. The evaluation of heat input through fences is an important part of the task of predicting the summer thermal regime of a building under a transparent dome, the interest in the construction of which in the northern regions has increased recently. In this work, a relatively simple model for engineering calculations of heat transfer through a building envelope with a translucent screen, which allows to take into account the greenhouse effect, is considered. The model has been verified by comparing the calculated and experimental data and their good agreement has been obtained, which confirms the performance of the proposed model. It is shown that the presence of a translucent screen due to the greenhouse effect significantly changes the temperature of the building wall under the dome and the value of heat flux, which implies the importance of taking into account such factors as the optical properties of the screen, the temperature of the sky, and other climatic factors when calculating the thermal regime of dome systems.

Keywords: heat transfer, radiation transfer, translucent screen, selective, reflection, dome, thermal regime, greenhouse effect, convection, thermal resistance, mathematical modeling.

For citation: Timofeev, A. M. Calculation of heat transfer through the building envelope with a translucent screen / A. M. Timofeev, D. V. Khariuzov // Vestnik of NEFU. 2022, No. 4(90). Pp. 40–47. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.25.61.005>

Введение

В связи с возрастающим интересом к строительству в северных регионах домов под прозрачным куполом встает задача оценки энергоэффективности таких сооружений. Снижение теплопотерь домов под куполом в холодное время года обусловлено дополнительным термическим сопротивлением воздушной прослойки подкупольного пространства, а также дополнительной аккумуляцией в нем энергии солнечного излучения, вызванного парниковым эффектом. Однако летом из-за парникового эффекта происходит перегрев в подкупольном пространстве, вынуждающий искать решения для охлаждения помещения. Прогноз влияния тех или иных конструктивных решений купольного сооружения на его тепловой режим основывается на математическом моделировании теплообмена в многослойной системе, которое в этом случае становится более сложным, так как кроме переноса тепла теплопроводностью и конвекцией нужно учитывать радиационный теплообмен при наличии экрана с селективными оптическими свойствами.

Имеющиеся публикации, рассматривающие теплопередачу с учетом проникающего излучения через полупрозрачные ограждающие конструкции на объектах гражданского строительства, в основном посвящены изучению теплового режима в промышленных теплицах [1–7]. Как показывают данные исследования, тепловой режим в теплицах зависит от большого числа параметров: используемых укрывных материалов, конструктивных особенностей теплицы, инфильтрации, испарения, влияния растений и концентрации диоксида углерода, различных внешних факторов: скорости ветра, внешней температуры и температуры неба и т. д. В результате приходится использовать для тепловых расчетов сложные математические модели, для решения которых привлекаются тяжеловесные программные продукты, такие как TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation program) [5, 6] или численные расчеты на основе гидродинамики и метода дискретных ординат [7].

В то же время актуальными остаются инженерные оценки характеристик теплообмена в многослойной купольной системе с учетом таких сложных явлений, как парниковый эффект [8]. Расчет тепlopоступлений через ограждения является важной частью задачи прогнозирования летнего теплового режима здания. В настоящей работе на основе предложенной в [8] модели теплопередачи через ограждающую конструкцию с полупрозрачным экраном рассмотрено влияние различных теплофизических и оптических факторов на тепlopоступления в подкупольное помещение.

Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим элемент купольной системы в виде плоской непрозрачной стенки и полупрозрачного экрана, между которыми находится воздушная прослойка (рис. 1). Экран считается прозрачным для падающего внешнего коротковолнового излучения (спектр I) и непрозрачным для длинноволнового излучения (спектр II), исходящего от стенки и окружающей среды. На внешних границах системы задано условие конвективного теплообмена с окружающей воздушной средой, соответственно с температурой T_0 на внутренней поверхности стенки (температура в помещении) и с температурой T_a на внешней поверхности экрана (температура окружающей среды).

Постановка задачи включает в себя следующие балансные соотношения. На внешней границе экрана плотность теплового потока q складывается из плотности конвективного теплового потока q_3^k , а также из плотности результирующего потока излучения в коротковолновой q^{r*} и длинноволновой q_2^r части спектра:

$$q = q_3^k + q_2^r + q^{r*}. \quad (1)$$

Используя законы Ньютона-Рихмана, Стефана-Больцмана и Кирхгофа, а также считая излучение небесного свода подобным излучению абсолютно черного тела с температурой T_s , соотношение (1) можно записать в виде:

$$q = \alpha_a (T_3 - T_a) + \varepsilon_3 (\sigma T_3^4 - \sigma T_s^4) - \varepsilon_1 q^*, \quad (2)$$

где T_3 – температура экрана (экран считается достаточно тонким, чтобы пренебречь изменением его температуры по толщине), α_a – коэффициент конвективного теплообмена, σ – постоянная Стефана-Больцмана, q^* – плотность потока падающего излучения в коротковолновой части спектра (солнечное излучение), ε_1 и ε_3 – излучательная способность (степень черноты) стенки в спектре I и экрана в спектре II соответственно.

Аналогичное (1) соотношение можно записать для теплового потока на внешней поверхности стенки ($y = \delta$):

$$q = q_2^k + q_1^r + q^r. \quad (3)$$

Плотность конвективного теплового потока здесь определяется из формулы:

$$q_2^k = (T_2 - T_3) / R_2, \quad (4)$$

где T_2 – температура внешней поверхности стенки, R_2 – эффективное тепловое сопротивление воздушного слоя с учетом теплопроводности и конвекции. Его значение может быть выражено с помощью уравнения:

$$R_2 = l / \lambda_k, \quad (5)$$

где $\lambda_k = f(Ra)$ – эффективный коэффициент теплопроводности, который зависит от числа Рэлея Ra , которое, в свою очередь, зависит от разности температур ($T_2 - T_3$) на границах слоя и его толщины l . Но в этом исследовании мы ограничились простым заданием значения R_2 .

Плотность потока излучения между стенкой и экраном с учетом того, что максимум излучения при заданных температурах располагается в длинноволновой части спектра, находится из формулы для результирующего потока излучения двух серых поверхностей:

$$q_1^r = \varepsilon_{23} (\sigma T_2^4 - \sigma T_3^4), \quad (6)$$

где

$$\varepsilon_{23} = 1 / (1/\varepsilon_2 + 1/\varepsilon_3 - 1) \quad (7)$$

– приведенная излучательная способность стенки и экрана; ε_2 и ε_3 – степени черноты стенки и экрана в спектре II.

Система уравнений (1)–(7) замыкается уравнением для плотности теплового потока с внутренней стороны стенки $q = q_1^k$:

$$q = (T_0 - T_2) / (1/\alpha_0 + R_1), \quad (8)$$

где R_1 – термическое сопротивление стенки, α_0 – коэффициент конвективного теплообмена. Радиационная составляющая теплового потока в (8) не учитывается ввиду незначительной разницы температур на внутренней поверхности стенки и окружающей среды.

Решение системы нелинейных уравнений (2)–(3)–(8) может быть получено с помощью вычислительных математических пакетов, в частности в среде MathCad.

Анализ результатов

Расчеты были проведены для следующих значений определяющих параметров: температура воздуха на внутренней поверхности стены $T_0 = 20$ °C, температура окружающей среды $T_a = 0$ °C. Значения коэффициентов α_0 и α_a приняты равными 8 Вт/(м²·К) и 20 Вт/(м²·К), что приблизительно соответствует условиям теплообмена внутри помещения и на наружных стенах при умеренном ветре [9–10].

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии полупрозрачного экрана на теплопередачу в условиях внешнего падающего излучения. На рис. 2–4 показано изменение температуры внешней поверхности стенки T_2 (рис. а) и плотности теплового потока q (рис. б) в зависимости от потока падающего внешнего излучения q^* . Наличие экрана приводит к значительному повышению температуры стенки (сплошные линии) по сравнению со случаем его отсутствия (пунктирные линии). По мере увеличения плотности падающего внешнего излучения эта тенденция усиливается, в то время как тепловой поток через стену уменьшается, и при достижении определенного значения q^* происходит его инверсия, то есть тепло начинает поступать в помещения.

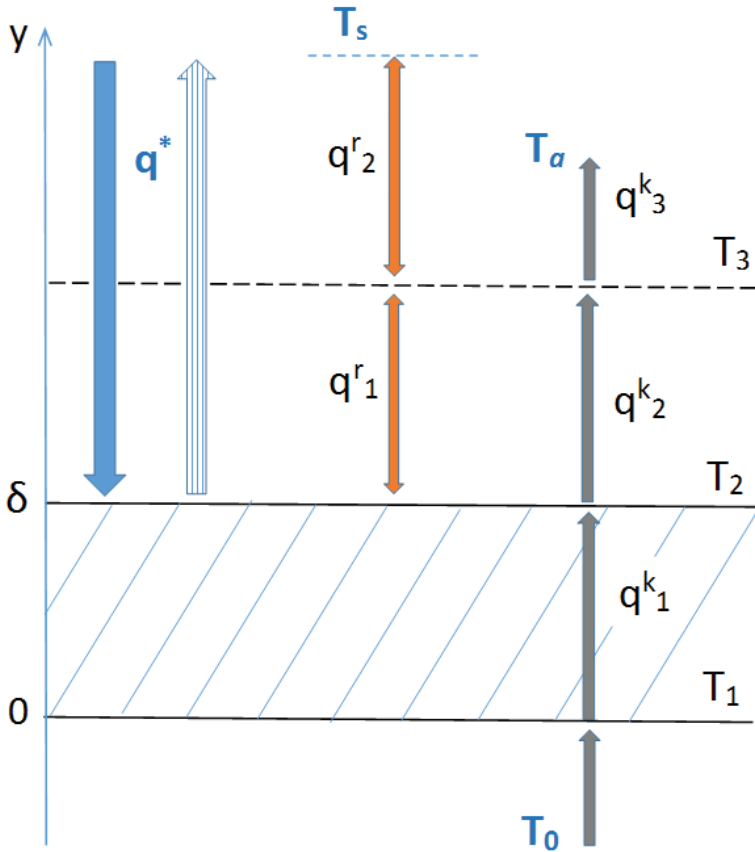


Рис. 1. Физическая схема и система координат
Fig. 1. Physical diagram and coordinate system

Отмеченный характер теплообмена зависит от ряда факторов. Как уже было сказано, излучение небесного свода учитывается как излучение абсолютно чёрного тела с температурой T_s , которая в зависимости от облачности на 5–30 градусов обычно ниже температуры воздуха на поверхности земли. Как видно из рис. 2, данный фактор заметно влияет на теплообмен. В результате радиационного охлаждения температура поверхности стенки при одинаковой температуре внешней среды может отличаться на несколько градусов (например, при выбранных значениях $R_1 = 1$, $R_2 = 1$ на три градуса), а теплового потока на 30%.

Влияние на теплообмен падающего излучения зависит от соотношения термического сопротивления стенки и воздушной прослойки (рис. 3). При одинаковом суммарном сопротивлении ограждающей конструкции здания ($R_1 + R_2$), парниковый эффект больше проявляется при преобладании термического сопротивления воздушной прослойки (R_2) над термическим сопротивлением стенки (R_1), что выражается в большем нагреве стенки и снижении тепловых потерь или поступлений тепла внутрь здания (кривые 1).

Следующий фактор, играющий важную роль в теплообмене в купольной системе, это оптические свойства экрана. Современные технологии позволяют, например, увеличивать коэффициент отражения светопрозрачных ограждающих конструкций в инфракрасной области, не изменяя при этом пропускание в видимой области спектра (низкоэмиссионные стекла, К-стекла и т. п.). Данные технологии используются в гражданском

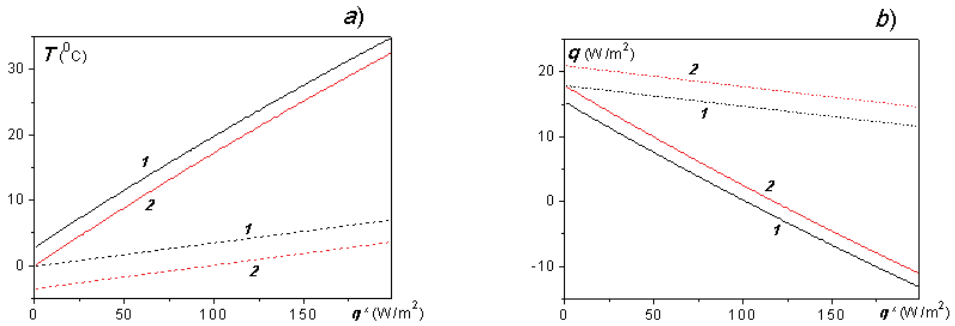


Рис. 2. Влияние на теплообмен температуры неба.

$$R_1 = 1, R_2 = 1, \varepsilon_1 = 0.9, \varepsilon_2 = 0.9, \varepsilon_3 = 0.9. 1 - T_s = -5^\circ\text{C}, 2 - T_s = -30^\circ\text{C}.$$

Здесь и далее сплошные линии – расчет с экраном, пунктирные линии – расчет без экрана

Fig. 2. Influence of sky temperature on heat transfer.

$$R_1 = 1, R_2 = 1, \varepsilon_1 = 0.9, \varepsilon_2 = 0.9, \varepsilon_3 = 0.9. 1 - T_s = -5^\circ\text{C}, 2 - T_s = -30^\circ\text{C}.$$

Hereinafter solid lines are calculations with screen, dashed lines are calculations without screen

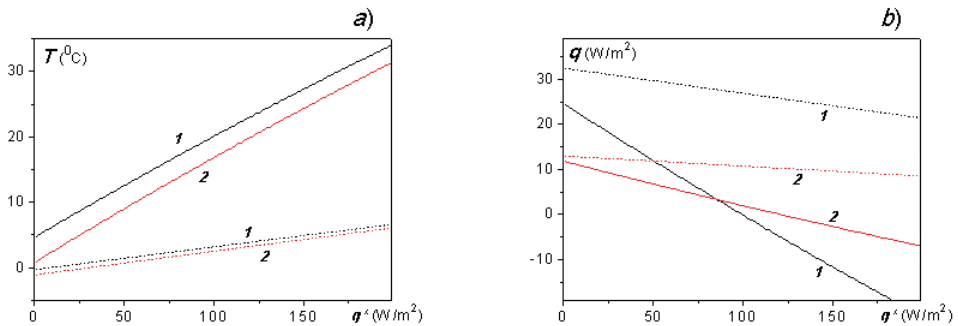


Рис. 3. Влияние на теплообмен термического сопротивления.

$$T_s = -10^\circ\text{C}, \varepsilon_1 = 0.9, \varepsilon_2 = 0.9, \varepsilon_3 = 0.9. 1 - R_1 = 0.5, R_2 = 1.5, 2 - R_1 = 1.5, R_2 = 0.5$$

Fig 3. Influence of thermal resistance on heat transfer.

$$T_s = -10^\circ\text{C}, \varepsilon_1 = 0.9, \varepsilon_2 = 0.9, \varepsilon_3 = 0.9. 1 - R_1 = 0.5, R_2 = 1.5, 2 - R_1 = 1.5, R_2 = 0.5$$

строительстве для снижения теплопотерь излучением через окна [11]. Увеличение коэффициента отражения экрана в длинноволновой части спектра (соответственно, снижение степени черноты экрана) из-за уменьшения радиационного охлаждения приводит к заметному росту температуры стенки и изменению величины теплового потока (рис. 4).

Для верификации модели было проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных при мониторинге дома под куполом, построенного на испытательном полигоне СВФУ под г. Якутском в 2019 г. Отметим, что данное исследование является частью работ, проводимых СВФУ по реализации этого эксперимента.

В таблице приведено сравнение нескольких расчетных значений температуры воздуха в подкупольном пространстве с аналогичными данными мониторинга. Полученное согласие экспериментальных и расчетных данных ($< 3\%$), следует считать весьма

неплохим, учитывая принятые в модели упрощающие допущения:

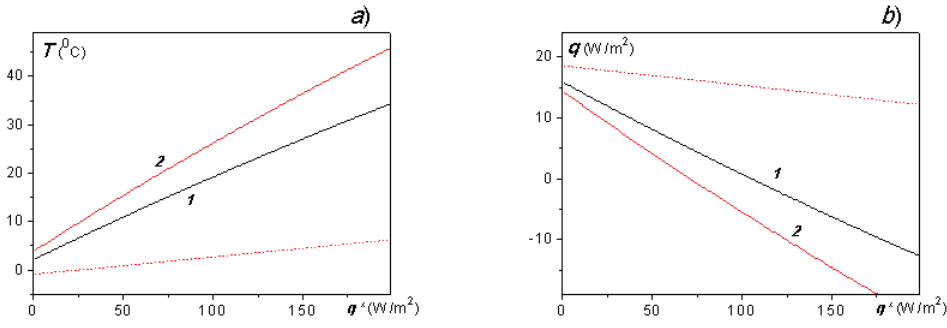


Рис. 4. Влияние на теплообмен оптических свойств.
 $T_s = -10^{\circ}\text{C}, R_1 = 1, R_2 = 1, \varepsilon_1 = 0.9, \varepsilon_2 = 0.9. 1 - \varepsilon_3 = 0.9, 2 - \varepsilon_3 = 0.5$
Fig. 4. Effect of optical properties to heat transfer.
 $T_s = -10^{\circ}\text{C}, R_1 = 1, R_2 = 1, \varepsilon_1 = 0.9, \varepsilon_2 = 0.9. 1 - \varepsilon_3 = 0.9, 2 - \varepsilon_3 = 0.5$

- расчеты проведены для плоской конструкции;
- при расчетах лучистого теплообмена, спектр излучения был рассмотрен в двухполосном приближении: коротковолновом и длинноволновом;
- оптические свойства экрана определены приближенно.

Таблица

Сравнение расчетной и экспериментальной температуры воздуха под куполом

Table

Comparison of calculated and experimental air temperatures under the dome

	Температура наружного воздуха, °С		Солнечная радиация, Вт/м²		Температура воздуха под куполом, °С	
	Экспериментальная	Принятая в расчетах	Экспериментальная	Принятая в расчетах	Экспериментальная	Расчетная
02.07.20	22,4	22	71,2	71	24,4	24,7
23.07.20	22,2	22	277,2	277	28,6	27,5
28.07.20	21,7	22	185,2	185	25,3	25,9

Заключение

Результаты расчетов и данные мониторинга свидетельствуют, что парниковый эффект играет заметную роль в теплообмене в купольной системе. Наличие прозрачного экрана приводит к существенному повышению температуры стенки и увеличению тепlopоступлений в помещение по сравнению со случаем его отсутствия.

Расчет тепlopоступлений через ограждения является важной частью задачи прогнозирования летнего теплового режима здания. В работе рассмотрена относительно простая, пригодная для инженерных расчетов модель теплопередачи через ограждающую конструкцию с полупрозрачным экраном, позволяющую учесть парниковый эффект. Для верификации модели было проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных и получено их хорошее согласие, что подтверждает работоспособность предложенной модели.

Конвекция в подкупольном пространстве учитывалась с помощью задания нормативного значения коэффициента α_2 [11]. Более точные значения коэффициента

теплообмена могут быть получены из моделирования естественной или принудительной циркуляции воздушных масс в подкупольном пространстве, рассмотрение которого выходит за рамки настоящего исследования.

При расчетах теплового режима здания под куполом следует обращать внимание на учет таких факторов, как оптические свойства экрана и стенки, температура небесного свода, соотношение термических сопротивлений стенки и воздушной прослойки. Таким образом, при разработке более точных тепловых моделей купольных систем требуются подробные сведения относительно спектральных оптических свойств полупрозрачного экрана и стен здания, поступающей радиации солнечного излучения в данной местности, климатических факторов.

Л и т е р а т у р а

1. Optimal control of greenhouse cultivation / G. Van Straten, E. Van Willigenburg, R. Van Henten, R. Van Oothghem. – 2011. – New York. – CRC Press, Taylor and Francis.
2. Pavlov, M. Modeling of greenhouse radiant heating / M. Pavlov, S. Lukin and O. Derevianko // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V.193 (03006).
3. Modeling and experimental validation of heat transfer and energy consumption in an innovative greenhouse structure / M. Taki, Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar [et al.] // Information Processing in Agriculture. – 2016. – V. 3. – № 3. – P. 157-174.
4. Joudi, K. A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse / K. Joudi, A. Farhan // Energy Convers Manage. – 2015. – № 91. – P. 76–82.
5. Development of a model to calculate the overall heat transfer coefficient of greenhouse covers / A. Rasheed, J. W. Lee, H. W. Lee // Spanish Journal of Agricultural Research. – 2017. – V. 15. – Issue 4, e0208. – 11 p.
6. Carlini, M. Modelling and simulation for energy production parametric dependence in greenhouses / M. Carlini, S. Castellucci // Mathematical Problems in Engineering. – 2010. – V. 2010. – Article ID 590943. – 28 p.
7. Simulation of Radiation and Crop Activity in a Greenhouse Covered with Semitransparent Organic Photovoltaics / C. Baxevanou, D. Fidaros, N. Katsoulas [et al.] // Applied Sciences (2076-3417). – 2020. – V. 10. – Issue 7. – P.2550.
8. Timofeev, A. M. Effect of Semitransparent Screen on Heat Transfer through a Flat Wall / A. M. Timofeev, A. R. Prokopiev, E. N. Alekseeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 666(3), 032089.
9. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: implementation and uncertainty / M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, J. L. M. Hensen // Appl Therm Eng. – 2013. – V.56(1–2). – P.134–51.
10. Defraeye, T. Convective heat transfer for exterior building surfaces: existing correlations and CFD modelling / T. Defraeye, B. Blocken, J. Carmeliet J. // Energy Convers Manage. – 2011. – V. 52(1). – P. 512–22.
11. Chudley, R. Building Construction Handbook / R. Chudley, R. Greeno. – 2010. – Elsevier. – 828 p.

R e f e r e n c e s

1. Optimal control of greenhouse cultivation / G. Van Straten, E. Van Willigenburg, R. Van Henten, R. Van Oothghem. – 2011. – New York. – CRC Press, Taylor and Francis.
2. Pavlov, M. Modeling of greenhouse radiant heating / M. Pavlov, S. Lukin and O. Derevianko // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V.193 (03006).
3. Modeling and experimental validation of heat transfer and energy consumption in an innovative greenhouse structure / M. Taki, Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar [et al.] // Information Processing in Agriculture. – 2016. – V. 3. – № 3. – P. 157-174.
4. Joudi, K. A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an

innovative greenhouse / K. Joudi, A. Farhan // *Energy Convers Manage.* – 2015. – № 91. – P. 76–82.

5. Development of a model to calculate the overall heat transfer coefficient of greenhouse covers / A. Rasheed, J. W. Lee, H. W. Lee // *Spanish Journal of Agricultural Research.* – 2017. – V. 15. – Issue 4, e0208. – 11 p.

6. Carlini, M. Modelling and simulation for energy production parametric dependence in greenhouses / M. Carlini, S. Castellucci // *Mathematical Problems in Engineering.* – 2010. – V. 2010. – Article ID 590943. – 28 p.

7. Simulation of Radiation and Crop Activity in a Greenhouse Covered with Semitransparent Organic Photovoltaics / C. Baxevanou, D. Fidaros, N. Katsoulas [et al.] // *Applied Sciences* (2076-3417). – 2020. – V. 10. – Issue 7. – P.2550.

8. Timofeev, A. M. Effect of Semitransparent Screen on Heat Transfer through a Flat Wall / A. M. Timofeev, A. R. Prokopiev, E. N. Alekseeva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2021. – V. 666(3), 032089.

9. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: implementation and uncertainty / M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, J. L. M. Hensen // *Appl Therm Eng.* – 2013. – V.56(1–2). – P.134–51.

10. Defraeye, T. Convective heat transfer for exterior building surfaces: existing correlations and CFD modelling / T. Defraeye, B. Blocken, J. Carmeliet J. // *Energy Convers Manag.* – 2011. – V. 52(1). – P. 512–22.

11. Chudley, R. *Building Construction Handbook* / R. Chudley, R. Greeno. – 2010. – Elsevier. – 828 p.

ТИМОФЕЕВ Айал Михайлович – д. ф.-м. н., профессор кафедры теплофизики и теплоэнергетики ФТИ, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

E-mail: am.timofeev@s-vfu.ru

ТИМОФЕЕВ Ayal Mikhailovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Thermal Physics and Thermal Power Engineering, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ХАРИУЗОВ Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры теплофизики и теплоэнергетики ФТИ, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

E-mail: dima_haruzov@mail.ru

KHARYUZOV Dmitry Vladimirovich – PhD student, Department of Thermal Physics and Thermal Power Engineering, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.