

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА

Т. В. Рябова, А. Б. Сулин, А. К. Рубцов, С. С. Муравейников

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Предложено для анализа процессов формирования теплового режима помещения использовать имитационную модель с черным шаровым термометром. Модель верифицирована по результатам натурного эксперимента. Показатели радиационного фактора учитываются в виде зависимостей средней радиационной разности температур от отклонения температуры шарового термометра. На базе предложенной модели выполнены численные эксперименты на примере модели помещения с теплоизолирующими панелями и охлажденным потолком.

**Ключевые слова:** моделирование процессов теплообмена, шаровой термометр, тепловой поток, тепловой режим помещений, теплоизлучающие панели.

### Введение

Условия теплового комфорта в современной практике проектирования систем кондиционирования воздуха определяются как результат взаимодействия микроклиматических факторов (конвективная температура, средняя радиационная температура, влажность и подвижность воздуха) и личностных факторов (физическая активность и термическое сопротивление одежды) [1, 2]. Радиационный фактор является одним из основных параметров, определяющих теплоощущения человека [3, 4]. В этой связи он эффективно используется для обеспечения заданного уровня теплового комфорта [5–8]. В этой связи актуальной задачей является разработка методик оценки данного фактора при обосновании эффективных решений систем жизнеобеспечения при наличии поверхностных источников выделения и стока теплоты.

### Объект исследования

Основными факторами, определяющими тепловой режим помещений, являются аэродинамический (конвективный) и радиационный [9–13]. При оценке радиационного фактора удобно использовать среднюю радиационную температуру ограждений. Данный комплексный показатель зависит от пространственной ориентации, а также от геометрических и температурных параметров ограждающих конструкций и установленного в помещении оборудования. Практически средняя радиационная температура измеряется в настоящее время с применением черного шарового термометра (сфера Вернона), диаметр которого регламентируется следующими размерами: 90 мм, 120 мм или 150 мм [14].

Достижение теплового баланса черного шара с окружающей средой предполагает выполнение равенства

$$q_r + q_c = 0, \quad (1)$$

где  $q_r$  — тепловой поток излучением между окружающими поверхностями и поверхностью шара, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_c$  — тепловой поток конвекцией между воздухом и поверхностью шара, Вт/м<sup>2</sup>.

Здесь

$$q_r = h_r (T_r^4 - T_g^4), \quad (2)$$

где  $T_r$  — средняя радиационная температура ограждений, К;  $T_g$  — температура шарового термометра, К;  $h_{rg} = \sigma + \varepsilon$  — коэффициент радиационной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), здесь постоянная Стефана – Больцмана  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>),  $\varepsilon$  — степень черноты (коэффициент эмиссии) поверхности черного шара.

$$q_c = h_{cg} (T_a - T_g), \quad (3)$$

где  $h_{cg}$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_a$  — температура воздуха.

Расчетные выражения коэффициентов теплоотдачи в соответствии с методикой, приведенной в [5], представляют собой: при свободной конвекции

$$h_{cg} = 1,4 \left( \frac{dT}{D} \right)^{1/4}, \quad (4)$$

при вынужденной (форсированной) конвекции

$$h_{cg} = 6,3 \left( \frac{v_a^{0,6}}{D^{0,4}} \right), \quad (5)$$

где  $D$  — диаметр шара, м;  $v_a$  — подвижность воздуха в районе поверхности шара, м/с.

Тепловой баланс на поверхности шарового термометра выражается уравнением

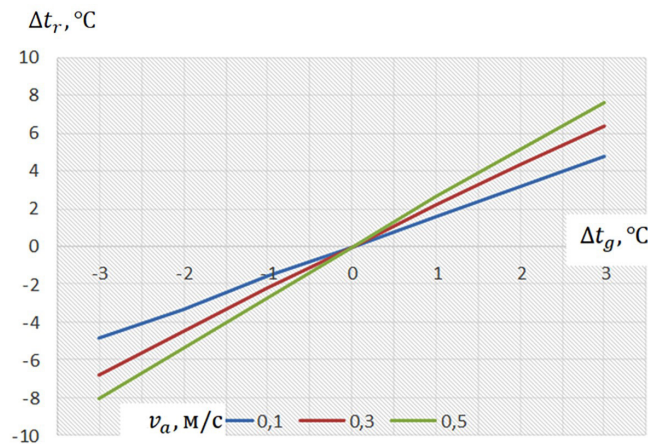


Рис. 1. Показатели радиационного фактора для диаметра шара 150 мм  
Fig. 1. Indicators of the radiation factor for the globe diameter 150 mm

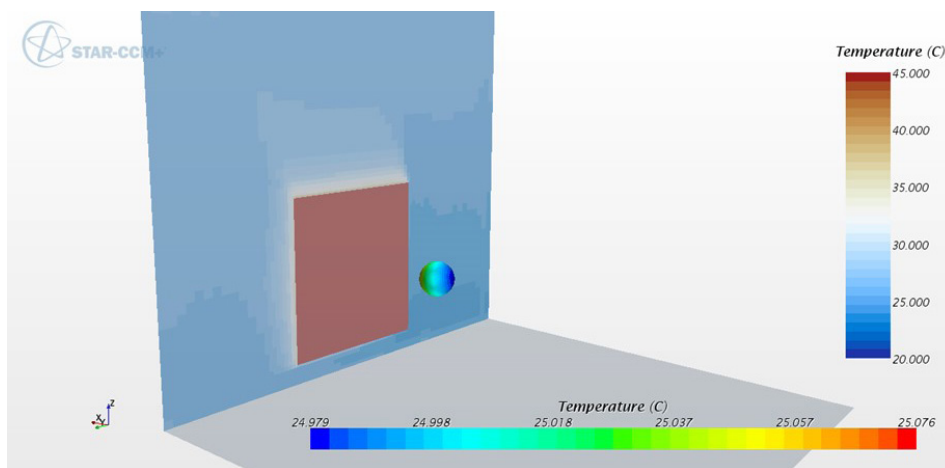


Рис. 2. Имитационная модель системы «теплоизлучающая панель–черный шар»  
Fig. 2. Simulation model of the system «radiant panel–black globe»

$$h_{rg}(T_r^4 - T_g^4) + h_{cg}(T_a - T_g) = 0, \quad (6)$$

тогда средняя радиационная температура определяется из выражения

$$T_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{h_{rg}}(T_g - T_a)}. \quad (7)$$

В результате для случая свободной конвекции получаем

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \left( \frac{0,25 \cdot 10^8}{\varepsilon} \right) \left( \frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \times \right]^{\frac{1}{4}} - 273. \quad (8)$$

Например, для стандартного шара  $D = 0,15$  м со степенью черноты  $\varepsilon = 0,95$  выражение имеет вид

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 0,4 \cdot 10^8 |t_g - t_a|^{\frac{1}{4}} \times \right]^{\frac{1}{4}} - 273. \quad (9)$$

Для случая вынужденной конвекции получаем

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6}}{\varepsilon D^{0,4}} \times \right]^{\frac{1}{4}} - 273. \quad (10)$$

С учетом стандартизованных диаметров шаров термометров:  
для диаметра 150 мм

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 2,47 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273, \quad (11)$$

для диаметра 120 мм

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 2,7 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273, \quad (12)$$

для диаметра 90 мм

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 3,03 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273. \quad (13)$$

Нами предложено описывать радиационный фактор с использованием средней радиационной

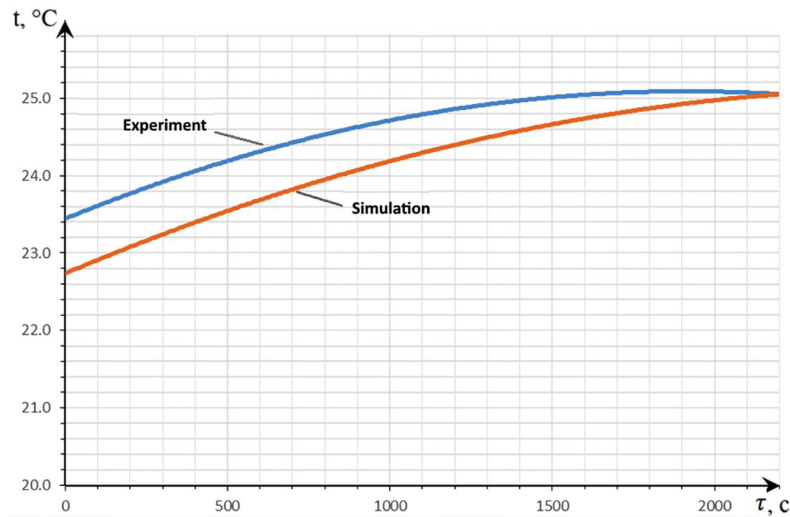


Рис. 3. Температура внутри шарового термометра  
Fig. 3. The temperature inside the globe thermometer

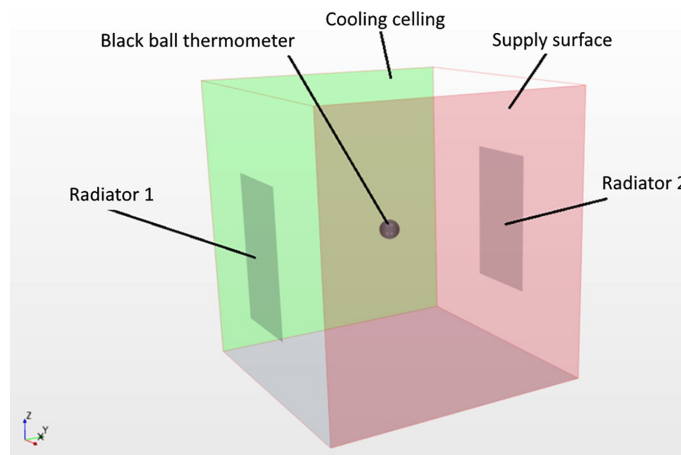


Рис. 4. Геометрическая модель системы с охлаждаемым потолком  
Fig. 4. Geometric model of the system with a cooled ceiling

разности температур  $\Delta t_r = (t_r - t_a)$ , в зависимости от которой формируется отклонение температуры черного шарового термометра от температуры воздуха помещения  $\Delta t_r = (t_r - t_a)$ . Расчеты показывают, что в комфортном диапазоне температуры помещения данные функции практически не зависят от значения температуры воздуха и представляют собой некоторую обобщающую характеристику радиационного фактора теплового режима помещения (рис. 1).

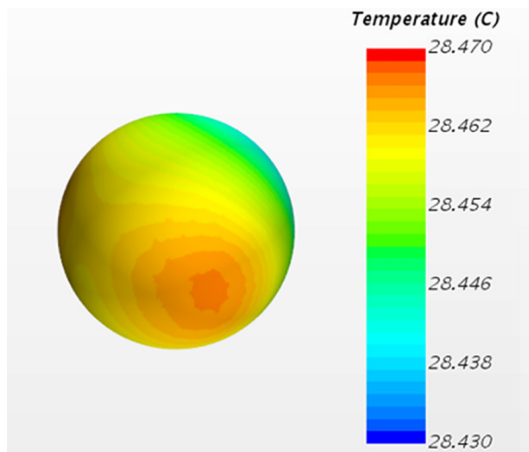
Предложенная методика анализа тепловых режимов помещения с применением имитационного моделирования обрабатывалась с применением физического и вычислительного эксперимента. Для верификации имитационной модели выполнены измерения температурного режима черного шарового термометра в условиях воздействия радиационного и аэродинамического факторов. Геометрическая схема имитационной модели, выполненная в соответствии со схемой экспериментального стенда, приведена на рис. 2. В качестве радиационной тепловой нагрузки использована теплоизолирующая панель, аэродина-

мический фактор моделировался потоком воздуха от осевого вентилятора.

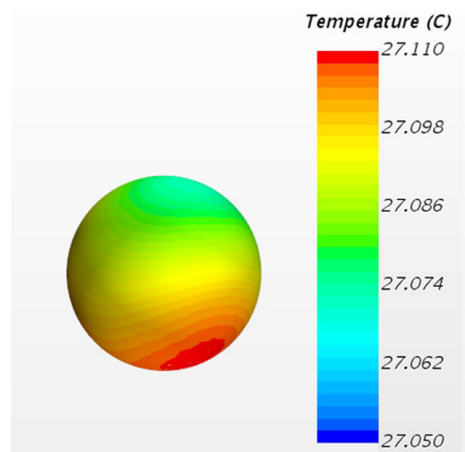
В качестве шарового термометра использован соответствующий измерительный зонд диаметром 150 мм, входящий в комплект поставки комплексного прибора для измерения параметров микроклимата testo 480 [15]. Результаты измерения функции температуры шарового зонда и результаты вычисления температуры в центре имитационной модели черного шара приведены на рис. 3. Совпадение функций температур после выхода системы на стационарный режим подтверждает, что процесс теплообмена черного шара моделируется корректно.

## Результаты

Выполненное исследование подтверждает эффективность применения методологии имитационного моделирования для анализа закономерностей формирования теплового режима в помещениях [16, 17]. Ниже приведен пример расчета радиационного фактора теплового воз-



**Рис. 5. Температура шара при выключенном охлаждающем потолке**  
**Fig. 5. The temperature of the black globe when the cooling ceiling is turned off**



**Рис. 6. Температура шара при включенном охлаждающем потолке**  
**Fig. 6. The temperature of the black globe when the cooling ceiling is turned on**

действия в помещении с двумя теплоизлучающими панелями и охлаждающим потолком (рис. 4). В соответствии с методикой вычислительного эксперимента черный шаровой термометр установлен в центре помещения между двумя теплоизлучающими панелями с температурой 60°C, начальная температура воздуха задана равной 25°C, начальная температура шара задана равной 23°C, подвижность воздуха принята равной 0,2 м/с. Сверху помещения установлен охлаждаемый потолок с температурой 17°C.

С данной моделью выполнены вычислительные эксперименты с включенным и с выключенным охлаждающим потолком. В результате расчета определялось температурное поле помещения и температура шарового термометра. На рис. 5 и 6 приведены результаты расчета температуры поверхности черного шара. В результате вычислений установлено, что температуры в центре черного шара, что соответствует показаниям шарового термометра, составили 28,5°C при выключенном охлаждающем потолке и 27°C при включенном.

После пересчета показаний черного шарового термометра в параметр средней радиационной температуры по зависимостям, приведенным на рис. 2, с учетом скорости воздуха 0,2 м/с получаем, что при выключенном потолке средняя радиационная температура помещения составляет примерно 31,5°C. Пересчет показаний шарового термометра в параметр средней радиационной температуры по зависимостям, приведенным на рис. 2, показал, что с учетом скорости воздуха 0,2 м/с при выключенном потолке средняя радиационная температура помещения составляет примерно 31,5°C. В то же время установлено, что включение охлаждающего потолка с температурой поверхности 17°C привело к снижению средней радиационной температуры до величины, примерно равной 28,7°C.

В исследовании показано, что имитационное моделирование процессов в шаровом термометре позволяет эффективно оценивать характер

формирования теплового режима в помещениях с использованием предложенных параметров средней радиационной разности температур и отклонения температуры черного шара.

#### Список источников

1. ГОСТ Р ИСО 7730—2009. Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфорта теплового режима с использованием расчетных показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта. Введ. 2010—12—01. М.: Стандартинформ, 2011. 38 с.
2. ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. URL: <http://arco-hvac.ir/wp-content/uploads/2015/11/ASHRAE-55-2010.pdf> (дата обращения: 18.01.2019).
3. Bauman F., Feng J. (Dove), Schiavon S. Cooling Load Calculations for Radiant Systems // ASHRAE. 2013. 20 p.
4. Сулин А. Б., Рябова Т. В., Иванов С. В., Поддубный Р. А. Расчетное обоснование параметров микроклимата с заданным уровнем теплового комфорта // Холодильная техника. 2017. № 4. С. 37—41.
5. Satakea A., Ikegama H., Mitania Y. Energy-saving operation and optimization of thermal comfort in thermal radiative cooling/heating system // 3rd International Conference on Power and Energy Systems Engineering. CPESE 2016. Japan, Kitakyushu. 2016. P. 8—12.
6. Stetiu C. Energy and peak power savings potential of radiant cooling systems in US commercial buildings // Energy and Buildings. 1999. Vol. 30. P. 127—138. DOI: 10.1016/S0378-7788(98)00080-2.
7. Doebber I., Moore M., Deru M. Radiant slab cooling for retail // ASHRAE. 2010. Vol. 52. 12 p.
8. Feng, J., Schiavon S., Bauman F. Impact of solar heat gain on radiant floor cooling system design // Proceedings, 11th REHVA World Congress-CLIMA 2013, Prague, Czech Republic, June. 2013. URL: <http://escholarship.org/uc/item/2913930b> (дата обращения: 18.01.2019).
9. Schiavon S., Bauman F., Tully B. [et al.]. Temperature stratification and air change effectiveness in a high cooling load office with two heat source heights in a combined chilled ceiling and displacement ventilation system // UC

Berkeley: Center for the Built Environment. 2012. 14 p. URL: <https://escholarship.org/uc/item/58m8302p> (дата обращения: 18.01.2019).

10. Feng J., Schiavon S., Bauman F. Cooling load differences between radiant and air systems // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 65. P. 358–367. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.06.009.

11. Zhao K., Liu X. H., Jiang Y. Dynamic performance of water-based radiant floors during start-up and high-intensity solar radiation // *Solar Energy*. 2014. Vol. 101. P. 232–244.

12. Bauman F., Feng J., Schiavon S. Cooling load calculations for radiant systems: are they the same traditional methods? // UC Berkeley: Center for the Built Environment. 2013. 27 p. URL: <https://escholarship.org/uc/item/6px642bj> (дата обращения: 18.01.2019).

13. Feng J., Schiavon S., Bauman F. Cooling load differences between radiant and air systems // *Energy and Buildings* 2013. Vol. 65. P. 310–321. URL: <http://escholarship.org/uc/item/7jh6m9sx> (дата обращения: 18.01.2019).

14. ИСО 7726: 1998. Эргономика термальной среды. Приборы для измерения физических величин. Введ. 1998–01–01. 56 с.

15. Testo 480 — Прибор для измерения климатических параметров. Руководство пользователя. М.: ООО Тэсто Рус. 52 с.

16. Tian Z., Love J. A. Energy performance optimization of radiant slab cooling using building simulation and field measurements // *Energy and Buildings* 2009. Vol. 41 (3). P. 320–330. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.10.002.

17. Feng, J., Bauman F., Schiavon S. Experimental comparison of zone cooling load between radiant and air systems // Submitted to *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 84. P. 152–159. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.07.080.

**РЯБОВА Татьяна Владимировна**, ассистент факультета низкотемпературной энергетики. SPIN-код: 7445-1807; AuthorID (РИНЦ): 700649  
Адрес для переписки:

[Ryabova\\_tatyana@corp.ifmo.ru](mailto:Ryabova_tatyana@corp.ifmo.ru)

**СУЛИН Александр Борисович**, доктор технических наук, ординарный доцент факультета низкотемпературной энергетики.

SPIN-код: 5540-5765

AuthorID (РИНЦ): 445299

Адрес для переписки: [miconata@rambler.ru](mailto:miconata@rambler.ru)

**РУБЦОВ Александр Константинович**, кандидат технических наук, доцент факультета низкотемпературной энергетики.

Адрес для переписки: [a\\_rubtsov@rambler.ru](mailto:a_rubtsov@rambler.ru)

**МУРАВЕЙНИКОВ Сергей Сергеевич**, старший лаборант межфакультетской лаборатории «Трансляционные технологии в образовании», аспирант факультета низкотемпературной энергетики.

Адрес для переписки: [ssmuraveinikov@corp.ifmo.ru](mailto:ssmuraveinikov@corp.ifmo.ru)

#### Для цитирования

Рябова Т. В., Сулин А. Б., Рубцов А. К., Муравейников С. С. Моделирование процессов радиационного теплообмена // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 71–77. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-71-77.

Статья поступила в редакцию 19.03.2019 г.

© Т. В. Рябова, А. Б. Сулин, А. К. Рубцов,

С. С. Муравейников

# MODELING OF RADIANT HEAT EXCHANGE PROCESSES

T. V. Ryabova, A. B. Sulin, A. K. Rubtsov, S. S. Muraveinikov

Saint Petersburg National Research University  
of Information Technologies, Mechanics and Optics,  
Russia, Saint Petersburg, Kronverkskiy Ave., 49, 197101

**It is proposed to use an imitation model with a black globe thermometer to analyze the processes of the room thermal regime formation. The model is verified by the results of a physical experiment. The indicators of the radiation factor are taken into account in the dependences of the average radiation temperature difference on the deviation of the temperature of the globe thermometer. On the basis of the proposed model, numerical experiments are performed on the example of a room model with heat-emitting panels and a cooled ceiling.**

**Keywords: modeling of heat transfer processes, ball thermometer, heat flow, thermal conditions of the premises, heat radiating panels.**

## References

1. GOST R ISO 7730 – 2009. Ergonomika termal'noy sredy. Analiticheskoye opredeleniye i interpretatsiya komfortnosti teplovogo rezhima s ispol'zovaniyem rascheta pokazateley PMV i PPD i kriteriyev lokal'nogo teplovogo komforta [Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Moscow: Standartinform Publ., 2011. 38 p. (In Russ.).
2. ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. URL: <http://arco-hvac.ir/wp-content/uploads/2015/11/ASHRAE-55-2010.pdf> (accessed: 18.01.2019). (In Engl.).
3. Bauman F., Feng J. (Dove), Schiavon S. Cooling Load Calculations for Radiant Systems // ASHRAE. 2013. 20 p. (In Engl.).
4. Sulin A. B., Ryabova T. V., Ivanov S. V., Poddubnyy R. A. Raschetnoye obosnovaniye parametrov mikroklimata s zadannym urovnem teplovogo komforta [The calculation of indoor climate parameters with the predetermined level of thermal comfort] // Kholodil'naya tekhnika. *Kholodil'naya Tekhnika*. 2017. No. 4. P. 37–41. (In Russ.).
5. Satakea A., Ikegama H., Mitania Y. Energy-saving operation and optimization of thermal comfort in thermal radiative cooling/heating system // 3rd International Conference on Power and Energy Systems Engineering. CPESE 2016. Japan, Kitakyushu. 2016. P. 8–12. (In Engl.).
6. Stetiu C. Energy and peak power savings potential of radiant cooling systems in US commercial buildings // Energy and Buildings. 1999. Vol. 30. P. 127–138. DOI: 10.1016/S0378-7788(98)00080-2. (In Engl.).
7. Doebber I., Moore M., Deru M. Radiant slab cooling for retail // ASHRAE. 2010. Vol. 52. 12 p. (In Engl.).
8. Feng, J., Schiavon S., Bauman F. Impact of solar heat gain on radiant floor cooling system design // Proceedings, 11th REHVA World Congress-CLIMA 2013, Prague, Czech Republic, June. 2013. URL: <http://escholarship.org/uc/item/2913930b> (accessed: 18.01.2019). (In Engl.).
9. Schiavon S., Bauman F., Tully B. [et al.]. Temperature stratification and air change effectiveness in a high cooling load office with two heat source heights in a combined chilled ceiling and displacement ventilation system // UC Berkeley: Center for the Built Environment. 2012. 14 p. URL: <https://escholarship.org/uc/item/58m8302p>. (accessed: 18.01.2019). (In Engl.).
10. Feng J., Schiavon S., Bauman F. Cooling load differences between radiant and air systems // Energy and Buildings. 2013. Vol. 65. P. 358–367. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.06.009. (In Engl.).
11. Zhao K., Liu X. H., Jiang Y. Dynamic performance of water-based radiant floors during start-up and high-intensity solar radiation // Solar Energy. 2014. Vol. 101. P. 232–244. (In Engl.).
12. Bauman F., Feng J., Schiavon S. Cooling load calculations for radiant systems: are they the same traditional methods? // UC Berkeley: Center for the Built Environment. 2013. 27 p. URL: <http://escholarship.org/uc/item/6px642bj> (accessed: 18.01.2019). (In Engl.).
13. Feng J., Schiavon S., Bauman F. Cooling load differences between radiant and air systems // Energy and Buildings 2013. Vol. 65. P. 310–321. URL: <http://escholarship.org/uc/item/7jh6m9sx> (accessed: 18.01.2019). (In Engl.).
14. ISO 7726: 1998. Ergonomika termal'noy sredy. Pribory dlya izmereniya fizicheskikh velichin [Ergonomics of the thermal environment. Instruments for measuring physical quantities]. 56 p. (In Russ.).
15. Testo 480 — Pribor dlya izmereniya klimaticheskikh parametrov. Rukovodstvo pol'zovatelya [Device for measuring climatic parameters. User's manual]. Moscow: Testo Rus Publ., 52 p. (In Russ.).
16. Tian Z., Love J. A. Energy performance optimization of radiant slab cooling using building simulation and field measurements // Energy and Buildings 2009. Vol. 41 (3). P. 320–330. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.10.002. (In Engl.).
17. Feng, J., Bauman F., Schiavon S. Experimental comparison of zone cooling load between radiant and air systems // Submitted to Energy and Buildings. 2014. Vol. 84. P. 152–159. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.07.080. ). (In Engl.).

**RYABOVA Tatyana Vladimirovna**, Assistant of Cryogenic Engineering Department.  
SPIN-code: 7445-1807

AuthorID (RSCI): 700649  
Address for correspondence:  
Ryabova\_tatyana@corp.ifmo.ru  
**SULIN Aleksandr Borisovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Cryogenic Engineering Department.  
SPIN-code: 5540-5765  
AuthorID (RSCI): 445299  
Address for correspondence: miconata@rambler.ru  
**RUBTSOV Aleksandr Konstantinovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Cryogenic Engineering Department.  
Address for correspondence: a\_rubtsov@rambler.ru  
**MURAVEINIKOV Sergey Sergeevich**, Senior Laboratory Assistant of the inter-faculty laboratory

«Translational Technologies in Education», Graduate student of Cryogenic Engineering Department.  
Address for correspondence:  
ssmuraveinikov@corp.ifmo.ru

#### For citations

Ryabova T. V., Sulin A. B., Rubtsov A. K., Muraveinikov S. S Modeling of radiant heat exchange processes // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 71 – 77. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-71-77.

Received 19 March 2019.

© T. V. Ryabova, A. B. Sulin, A. K. Rubtsov, S. S. Muraveinikov