

ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА

В. В. Стерлигов, В. К. Дробышев

Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Проведено исследование по определению показателей и характеристик процесса потепления в терминах, понятных широкому кругу людей, с использованием доказательств из источников достаточно известных в мире. Эта работа позволит хотя бы приблизительно дать оценку количественным показателям явлений, представляющим значимый научный и социальный интерес.

Ключевые слова: потепление климата, парниковый эффект, лучистый теплообмен, степень черноты, оксид углерода CO₂

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания (шифр 0809-2021-0013).

Для цитирования: Стерлигов В.В., Дробышев В.К. Оценка теплофизических параметров парникового эффекта // Вестник СибГИУ. 2022. № 2 (40). С. 71 – 76.

ASSESSMENT OF THERMOPHYSICAL PARAMETERS OF THE GREENHOUSE EFFECT

V. V. Sterligov, V. K. Drobyshev

Siberian State Industrial University (42 Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region–Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. A study was conducted aimed at determining the indicators and characteristics of the warming process in terms understandable to a wide range of people, using evidence from sources well known in the world. This work will allow at least an approximate assessment of quantitative indicators of phenomena of significant scientific and social interest for a wide range of readers.

Keywords: climate warming, greenhouse effect, radiant heat transfer, degree of blackness, carbon oxide CO₂

Financing. The work was carried out within the framework of the state task (code 0809-2021-0013).

For citation: Sterligov V. V., Drobyshev V. K. Estimation of thermophysical parameters of the greenhouse effect. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 71 – 76 (In Russ.).

Проблемой современного общества является глобальное потепление климата на Земле. Организация объединенных наций приняла специальный документ, посвященный этому вопросу («Рамочная Конвенция по вопросам изменения климата») [1]. Эта концептуальная разработка была реализована через ряд решений конкретного характера и прямого действия, включая Киотский протокол [2], а поскольку его срок действия закончился в 2012 г., то в развитие его было выработано «Парижское согла-

шение», подписанное в декабре 2015 г. главами более 190 стран.

Потепление климата имеет феноменологический характер, то есть признается сам факт существования явления без научного описания причинно-следственной связи между разными факторами климатической катастрофы. Тем самым, правильность самого предположения остается недоказанной. Кроме метеорологии (климата), здесь присутствует и экономика, и география, и демография и многое другое, что определяет жизнь людей.

Настоящая работа направлена на определение некоторых показателей и характеристик процесса потепления, оценки их влияния на глобальные тенденции. Исследование позволит хотя бы приблизительно дать оценку количественным показателям в терминах, понятных широкому кругу людей, сообщая доказательства, основанные известных в мире на источниках.

Объектом изучения является планета Земля, которая при движении в космосе, сопровождается газовой оболочкой присоединенного воздуха, называемой стратосферой. В атмосфере, имеющей несколько характерных слоев, выделяется тропосфера, первый слой от поверхности земли, высотой (толщиной) в среднем 10 км. В этом слое сосредоточено 80 % всей массы стратосферы, в котором протекают основные процессы формирования облаков, развитие турбулентностей и циклонов-антициклонов [3]. В этом допущении уже виден характер исследования – найти «оценку» величины, определить хотя бы порядок. Сравнивая размеры Земного шара с радиусом $R = 6370$ км и тропосферы (толщина слоя 10 км), находим, что площадь поверхности Земли A_3 и верхней поверхности тропосферы газовой оболочки A_T отличаются на доли процента (около 0,2 %), то есть $A_3 \approx A_T$. Известно [4], что такое условие выполняется для двух бесконечно больших плоскопараллельных поверхностей, поэтому в расчетах принимали, что слой тропосферы плоский.

При расчете лучистого теплообмена, который реализуется в газовом слое тропосферы, необходимо знать расчетную толщину S газового слоя. Из теории теплопередачи [5] для такой геометрии $S = 1,8\delta$ (где δ – толщина слоя, м).

Ниже представлена попытка рассмотреть «парниковый эффект» с позиции теплопередачи, используемой для описания лучистого теплообмена в теплотехнических агрегатах, где достигается адекватность расчетной модели и практических результатов.

Общепринятый механизм лучистого теплообмена представлен на рисунке.

Приходящее из космоса излучение E_k реализуется на «жестких» (коротких) волнах, которые в большей части поглощаются поверхностью Земли. Разница $E_k - \Delta E_k = E_3$ отражается (излучается) Землей на длинных волнах, соответствующих тепловой части спектра. Это тепло может поглощаться газами, которые имеют в своем составе три и более молекул (CO_2 , H_2O , CH_4 , NH_3 , озон и другие). Пройдя через газовый слой, оставшаяся лучистая энергия Солнца $E_3 - E_T$ проходит через контрольную поверхность в космос, где поглощается. Эта способность поглощать лучистую энергию характеризуется

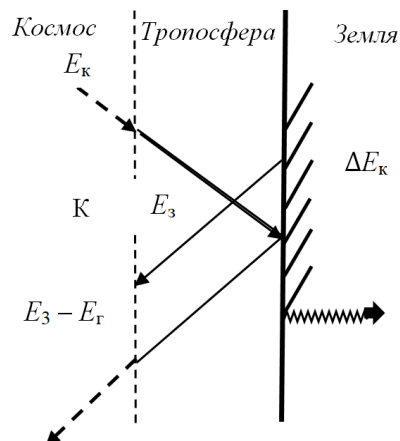


Схема лучистого теплообмена:

E_k – космическое излучение; ΔE_k – поглощенное Землей излучение; E_3 – излучение Земли; E_T – излучение, поглощенного газа

The scheme of radiant heat exchange:

E_k – cosmic radiation; ΔE_k – radiation absorbed by the Earth; E_3 – radiation of the Earth; E_T – radiation of absorbed gas

«степенью черноты» газа E_T , которая зависит от толщины газового слоя (эффективной длины луча) S и состава газа, выражаемого через парциальное давление поглощающего газа P_T , Па.

Исходя из этих определений, расчет проводится при следующих допущениях:

- слой рассматривается как бесконечно плоский;
- учитывается действие только оксида CO_2 ;
- излучение является единственным видом теплообмена;
- максимальной в системе является температура поверхности Земли ($t_3 = 27^\circ\text{C}$; $T_3 = 300$ К);
- температура космоса $T_k = 0$ К;
- реальный процесс парникового эффекта представляется как теплообмен излучениями между двумя плоскими поверхностями (Земли и верхней границы тропосферы).

Уравнение лучистого теплообмена между двумя поверхностями, разделенными слоем поглощающего газа, описывается уравнением [5]:

$$q_{3-k} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_3}{T_{100}} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{T_{100}} \right)^4 \right], \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (1)$$

где q_{3-k} – плотность теплового потока; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы; C_0 – коэффициент излучения идеального излучателя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; T_3 и T_k – абсолютная температура поверхности Земли и космоса, К.

Для рассматриваемой геометрии [6] тепло, усвоенное газовым слоем, определяется

$$q_T = \varepsilon_T q_{3-k}. \quad (2)$$

После подстановки всех известных параметров действующих факторов получим тепловой поток, усваиваемый газом:

$$q_{\Gamma} = \varepsilon_r \varepsilon_3 C_0 \left(\frac{T_3}{T_{100}} \right)^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (3)$$

Уравнение (3) учитывает условия $\varepsilon_k = 1$, $T_k = 0$ К и позволяет получить оценку плотности теплового потока (то есть мощность теплового потока на 1 м^2 поверхности).

Общее количество тепла, поглощенное всей поверхностью $A_{\text{п}}$, м^2 , в течение времени τ , с, определится из выражения

$$Q_{\Gamma} = q_{\Gamma} A_{\Gamma} \tau, \text{ Дж}. \quad (4)$$

Выражения (1) – (3) для оценки интенсивности теплового излучения содержат параметр ε (степень черноты), который характеризует степень совершенства излучателя по сравнению с идеальным, для которого $\varepsilon_0 = 1$, для реальных тел излучателей $\varepsilon < 1$. Для земной поверхности можно принять $\varepsilon_3 = 0,8$ [6].

Степень черноты газов (атмосферы) ε_r зависит от состава атмосферы, определяемого через парциальное давление P , Па, от геометрии (длина свободного пробега излучения, «эффективная длина луча») S , м, температуры газов T_r , К.

Для оксида CO_2 степень черноты принято считать по уравнению Хоттеля [7], когда определяется величина интенсивности теплового потока E_{CO_2} :

$$E_{\text{CO}_2} = 3,5(PS)^{0,33} C_0 \left(\frac{T_r}{T_{100}} \right)^{3,5}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (5)$$

Зависимость (5) приводится к универсальной форме закона излучения Стефана – Больцмана:

$$E_{\text{CO}_2} = \varepsilon_{\text{CO}_2} C_0 \left(\frac{T_r}{T_{100}} \right)^4. \quad (6)$$

Из условий идентичности уравнений (5) и (6) определяется выражение для степени черноты оксида CO_2 , то есть $\varepsilon_{\text{CO}_2} = \varepsilon_r$:

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = f(PS; T_r). \quad (7)$$

Для практического применения используется диаграмма, содержащая графическую интерпретацию зависимости (7). Для этого определяется по условиям задачи парциальное давление P , ата, и

эффективную длину луча. Из закона Дальтона [8] получим

$$P_{\text{CO}_2} = P \cdot \text{CO}_2 = 1 \cdot 0,0004 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ ата}. \quad (8)$$

Концентрация оксида CO_2 в атмосфере составляет 0,04 % взята из работы [9]. В других источниках содержатся следующие значения для концентрации CO_2 в воздухе: 0,0314 % [10]; 0,0333 – 0,0337 % [11]; 0,03 – 0,05 % [12]. В дальнейшем будем использовать значение $\text{CO}_2 = 0,04$ %.

При подстановке значений получим

$$E_{\text{CO}_2} = 1,163 \cdot 3,5 (4 \cdot 10^{-4} \cdot 168 \cdot 10^3)^{0,33} \left(\frac{260}{100} \right)^{3,5} = 102,65 \text{ Вт/м}^2.$$

Степень черноты оксида CO_2 $\varepsilon_r = 0,39$.

Подставляя значение ε_r и ε_3 в уравнение (4), получим

$$q_{\Gamma} = 0,39 \cdot 0,8 (1 - 0,39) \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 = 8,69 \text{ Вт/м}^2.$$

Используя справочные данные [3], для площади поверхности тропосферы Земли $A_3 = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$, длительность года $\tau = 31,536 \cdot 10^6$ с определим количество тепла, полученное газовым слоем тропосферы:

$$Q_{\Gamma} = q_{\Gamma} A_{\Gamma} \tau = 8,69 \cdot 5,1 \cdot 10^{14} \cdot 31,536 \cdot 10^6 = 139,76 \cdot 10^{21} \text{ Дж}.$$

Из уравнения теплового баланса

$$Q_{\Gamma} = C_r M_r \Delta t, \text{ Дж}, \quad (9)$$

можно найти возможное увеличение температуры газового слоя за год:

$$\Delta t = \frac{Q_{\Gamma}}{C_r M_r}. \quad (10)$$

Из работы [8] для теплоемкости воздуха $c = 1 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ [8] и масса тропосферы $M_r = 4,2 \cdot 10^{18} \text{ кг}$, получим

$$\Delta t = \frac{70,6 \cdot 10^{21}}{1 \cdot 10^3 \cdot 4,2 \cdot 10^{18}} = 17,5 \text{ } ^\circ \text{C}.$$

Практические данные (1 – 2 °C) значительно отличаются от полученных результатов расчета, сле-

довательно, составленная математическая модель не адекватная практике, хотя задача и ее решение поставлены физически корректно, о чем свидетельствует размерность определяемых величин.

Следующим этапом будут операции, которые определяются в теории моделирования как «идентификация модели», то есть нахождение численных коэффициентов, принятых при аппроксимации условий модели, которые бы создавали адекватность модели процессу.

Такие показатели как степень черноты земной поверхности, на 60 % состоящей из поверхности мирового океана, средние температуры слоя газов и поверхности Земли, выделение в качестве объекта исследования только тропосферы сразу вносили возможность ошибки. Расчеты позволили определить порядок величин, причем глобального уровня, и это уже можно считать позитивным результатом, хотя и не подтвержденным практикой. Это подчеркивает практическую невозможность решения такой задачи, так как нужно создать точные локальные характеристики разных участков земной коры для разных времен года, разных стран и так далее. Полезность результата настоящей работы – доказательство верности методологического подхода и возможность использовать этот материал как демонстрационный при обучении специалистов.

Одним из способов идентификации модели является численное моделирование, когда проводят ряд расчетов при различных исходных данных с тем, чтобы приблизиться к практическим (реальным) данным на основе предложенной структуры модели.

Анализ расчетной модели выявляет различные физические факторы (среди которых в первую очередь будут влиять степень черноты разных участков земной поверхности, ее температура) и можно получить разные численные результаты.

Если учесть, что 30 – 40 % поверхности Земли занято суши со степенью черноты 0,8, а 60 – 70 % – занято водой со степенью черноты 0,2, можно получить средневзвешенное значение степени черноты поверхности земного шара:

$$\varepsilon_3 = 0,3 \cdot 0,8 + 0,7 \cdot 0,2 = 0,38.$$

Если считать теплообмен для летнего периода при температуре $T_3 = 310$ К, получим

$$q_3 = \varepsilon_3 C_0 \left(\frac{T_3}{T_{100}} \right)^4 = 20,29 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Для зимнего периода при использовании показателей снега ($\varepsilon_3 = 0,96$ и $T_3 = 250$ К) получим среднее значение степени черноты земной поверхности:

$$\varepsilon_3 = 0,3 \cdot 0,96 + 0,7 \cdot 0,2 = 0,44;$$

$$q_3 = 0,44 \cdot 5,77 \left(\frac{250}{T_{100}} \right)^4 = 99,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Из этих расчетов видим, что тепловое излучение Земли в космос, часть которого удерживается в тропосфере, может колебаться в значительном диапазоне, для рассматриваемого сочетания входных факторов почти в два раза. Следовательно, и повышение температуры тропосферы может изменяться тоже в два раза. Для получения адекватной модели нужно точно определить эти факторы, обобщенные средней величиной степени черноты земной поверхности и температуры ввиду ее слишком выраженной неравномерностью локальных значений, вызванных метеорологическими условиями.

Используя данные из работы [14], Земля получает от Солнца в год $Q_c = 1,66 \cdot 10^{25}$ ккал. Из них 60 % поглощается атмосферой (большей частью ультрафиолетового излучения) и до Земли доходит только 40 % от величины Q_3 :

$$Q_3 = 0,4 Q_c = 0,664 \cdot 10^{25} \frac{\text{ккал}}{\text{год}}.$$

В соответствии с теорией лучистого теплообмена Земля от этого количества поглощает $Q_3^{\text{полг}} = \varepsilon_3 Q_3 = 0,252 \cdot 10^{21} \frac{\text{ккал}}{\text{год}}$, а остальное переизлучает в атмосферу и в космос в количестве

$$Q_3^{\text{изл}} = (1 - \varepsilon_3) Q_3 = 0,160 \cdot 10^{21} \frac{\text{ккал}}{\text{год}}.$$

Часть этого тепла будет поглощаться тропосферой, что приведет к увеличению температуры газа: $Q_r = \varepsilon_r Q_3^{\text{изл}} = 0,160 \cdot 10^{21}$ ккал.

На основании теплового баланса для газов можно записать $Q_r = C_{\text{сп}} M_r \Delta t_2$.

По полученному уравнению можно определить возможное повышение температуры. Определив теплоемкость для воздуха $Q = 0,31$ ккал/(К·град) при $t = 0$ °С и массу тропосферы $M = 0,8 M_{\text{ст}} = 4,2 \cdot 10^{21}$ кг, получим $\Delta t = Q_r / (C_{\text{сп}} M_r)$. После подстановки численных значений $\Delta t = 15,8$.

Из результатов сравнения расчетов возможного возрастания температуры видно (по теоретической модели и из данных сальдо-потока на Землю), что они дают значения одного порядка. Первая из них рассчитана на основе гипотезы о применимости геометрической модели теплообмена между Землей и космосом как случая теплообмена между бесконечно большими плоскопараллельными поверхностями, для одной из которых в представленной модели степень черноты космоса $\varepsilon_k = 1$, что логически оправдано.

Совпадение результатов использования теоретической модели теплообмена (гипотезы) и эмпирического обобщения требует признания факта приближения к истине.

Из литературы известна еще одна величина, характеризующая явление излучения Солнца на Землю. В работе [13] содержится понятие «постоянной солнечной радиации» $E = 2 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$, которое определяет количество солнечной энергии, приходящейся на 1 см^2 перпендикулярно расположенной поверхности, равной. Эту величину можно связать с оценками Аррениуса, которыми оперирует В.И. Вернадский записав $Q_c = EF\tau, \frac{\text{ккал}}{\text{год}}$.

В качестве величины F нужно принять проекцию земного шара на поверхность, перпендикулярную направлению лучей, то есть площадь тени Земли.

Определив $\tau = 51,81 \cdot 10^3$ мин и $F = \pi R_3^2 = 127,476 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$, после подстановки получим $Q = 1,340 \cdot 10^{24} \frac{\text{кал}}{\text{год}} = 1,340 \cdot 10^{21} \frac{\text{ккал}}{\text{год}}$.

Это почти на порядок отличается от данных С. Аррениуса и расчетов В.И. Вернадского, где $Q_c = 1,66 \cdot 10^{25} \frac{\text{ккал}}{\text{год}}$.

Таким образом, становится очевидным, что детерминированная модель теплообмена не дает адекватных результатов, а статистический подход, изложенный в работе [16], позволяет определить тренд изменения температуры атмосферы. Упомянутый доклад содержит диаграмму, где в хронологическом порядке за период 1939 – 2018 гг. представлены температурные аномалии в России, рассчитанные как отклонения от средней глобальной температуры.

За период 1969 – 1990 гг. было выявлено линейное повышение температуры в пределах $0,47 \text{ }^\circ\text{C}$ за десятилетие, что в 2,5 раза больше глобального показателя ($0,18 \text{ }^\circ\text{C}$ за десятилетие). Внутри территории страны существует значительный разброс этого показателя по регионам. Так, для крайнего Севера и Дальнего Востока за период 1976 – 2013 гг. он составил $0,81 \text{ }^\circ\text{C}$, для Запада европейской части России около $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, а для Юга Западной Сибири $0,2 - 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ за десятилетия. Кроме того, отмечаются и сезонные колебания среднего значения по стране за десятилетие: для зимнего периода характерна цифра $0,39 \text{ }^\circ\text{C}$; для летнего – $0,41 \text{ }^\circ\text{C}$; для весеннего – $0,61 \text{ }^\circ\text{C}$.

Это является практическим подтверждением вывода о том, что определение температурных трендов носит феноменологический характер на базе регулярной систематической регистрации этого параметра, с позиции математической статистики эти величины являются «случайными», то есть определяемые с известной погрешностью. Данные этих наблюдений

имеют неоспоримый характер, но вызывает сомнение возможность их применения для уверенного прогнозирования. В этом случае необходимо проводить экстраполяцию опытных зависимостей, что не всегда допустимо. Обращаясь к уже упомянутой диаграмме в работе [16], можно увидеть, что в период 1930 – 1970 гг. существовал очень слабый тренд к понижению температуры, и используя его можно было прийти к выводу о будущем похолодании, что последующие годы не подтвердили.

Математические процедуры создания прогнозов (сценариев) изменения климата довольно сложны и основаны на анализе нескольких моделей общей циркуляции. Существующий международный орган по изучению изменения климата (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) использует стадильную методологию с привлечением мощной сети обсерваторий и компьютерных центров [17]. Эта методология понятно только специалистам. Для разъяснения, информирования и популяризации рассматриваемых проблем нужны другие подходы к описанию и их моделированию.

Выводы

Признавая значимость проблемы, Правительство России приняло стратегию социально-экологического развития страны на основе снижения выбросов. Для решения многих вопросов нужна математическая модель этого явления (потепление климата). Приведенный анализ показал, что даже при наличии правильной физической методологии лучистого теплообмена в газовой среде для проблемы парникового эффекта это решение возможно только при большом массиве практически данных (степень черноты, температура, контуры и площадь отдельных участков Земли), что достижимо только на основе большого количества показателей и наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рамочная конвенция ООН об изменении климата. 1962.
2. Киотский протокол. Электронный ресурс. URL: www.carbonmarketsolutions.com. (Дата обращения: 04.03.2022).
3. Советский энциклопедический словарь. IV издание. М.: Советская энциклопедия, 1987. 1600 с.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. СПб.: Лань, 2010. 608 с.
5. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.
6. Казанцев Е.И. Промышленные печи. М. Металлургия. 1964, 462 с.
7. Мак-Адамс В.Х. Теплопередача / Перевод с англ. Б.Л. Маркова; под ред. Л.С. Эйгенсо-

- на, К.Д. Воскресенского. М.: Metallurgizdat, 1961. 686 с.
8. Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства веществ. М.: Госэнергоиздат, 1956. 683 с.
 9. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматлит, 1963. 562 с.
 10. Бюллетень ВМО по парниковым газам. 2019. № 15.
 11. Grandars. ru. Электронный ресурс. URL: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/sostav-atmosfery/htme> (Дата обращения: 04.03.2022).
 12. Планета Земля. Электронный ресурс. URL: <http://wonderful-planet.ru/atmosphere/97> (Дата обращения: 04.03.2022).
 13. Экобаланс. Независимая экологическая экспертиза/ Электронный ресурс. URL: <http://ecobalans.ru/investigations> (Дата обращения: 04.03.2022).
 14. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. М.: Госэнергоиздат, 1962. 382 с.
 15. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис, 2003. 575 с.
 16. Хендель А. Основные законы физики. М.: Физматгиз, 1958. 284 с.
 17. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 г. М.: Росгидромет, 2019. 76 с.
 18. Special Report of Working Group I and II of IPCC. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND. 2012. P. 109–230.
 9. Vargaftik N.B. *Handbook of thermophysical properties of gases and liquids*. Moscow: Fizmatlit, 1963, 562 p. (In Russ.).
 10. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*. 2019, no. 15. (In Russ.).
 11. *Grandars*. ru. Electronic resource. URL: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/sostav-atmosfery/htme> (Data obrashcheniya: 04.03.2022).
 12. *Planet Earth*. Electronic resource. URL: <http://wonderful-planet.ru/atmosphere/97> (Data obrashcheniya: 04.03.2022). (In Russ.).
 13. *Ecobalance. Independent environmental expertise*. Electronic resource. URL: <http://ecobalans.ru/investigations> (Data obrashcheniya: 04.03.2022).
 14. Blokh A.G. *Fundamentals of heat exchange by radiation*. Moscow: Gosenergoizdat, 1962, 382 p. (In Russ.).
 15. Vernadskii V.I. *Biosphere and noosphere*. Moscow: Airis, 2003, 575 p. (In Russ.).
 16. Khendel' A. *Basic laws of physics*. Moscow: Fizmatgiz, 1958, 284 p. (In Russ.).
 17. *Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2018*. Moscow: Rosgidromet, 2019, 76 p. (In Russ.).
 18. *Special Report of Working Group I and II of IPCC*. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND. 2012. P. 109–230.

Сведения об авторах

Владислав Викторович Стерлигов, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: kafedra-tee@yandex.ru

Владислав Константинович Дробышев, магистрант кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: drobyshev_v.k@mail.ru

Information about the authors

Vladislav V. Sterligov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: kafedra-tee@yandex.ru

Vladislav K. Drobyshev, Master's student of the Department of Electrical Engineering, Electric Drive and Industrial Electronics, Siberian State Industrial University
E-mail: drobyshev_v.k@mail.ru

REFERENCES

1. *The UN Framework Convention on Climate Change*. 1962. (In Russ.).
2. *Kyoto Protocol*. Electronic resource. URL: www.carbonmarketsolutions.com. (Accessed: 04.03.2022). (In Russ.).
3. *Soviet Encyclopedic Dictionary*. IV edition. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1987, 1600 p. (In Russ.).
4. Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. *Handbook of Mathematics for engineers and university students*. St. Petersburg: Lan', 2010. 608 s. (In Russ.).
5. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Fundamentals of heat transfer*. Moscow: Energiya, 1973, 320 p. (In Russ.).
6. Kazantsev E.I. *Industrial furnaces*. Moscow: Metallurgiya. 1964, 462 p. (In Russ.).
7. Mak-Adams V.H. Eigenson L.S. ed., Voskresenskov K.D. *Heat Transfer*. Perevod s angl. Markov B.L. Moscow: Metallurgizdat, 1961, 686 p. (In Russ.).
8. Vargaftik N.B. *Thermophysical properties of substances*. Moscow: Gosenergoizdat, 1956, 683 p. (In Russ.).

© 2022 г. В.В. Стерлигов, В.К. Дробышев
 Поступила в редакцию 4 марта 2022 г.