



ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО ЭКРАНА ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

А.А. Егоркин^{1,2}, В.П. Евстигнеев^{1,2}, С.Ю. Самойлов²

¹Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: egorkin1974@yandex.ru

Для измерения приземной температуры окружающей среды используются специальные датчики. Темпы глобального изменения приземной температуры воздуха составляют около $0,2^{\circ}\text{C}$ за десятилетие. Из-за воздействия солнечной радиации современные датчики температуры воздуха внутри естественно вентилируемого радиационного экрана могут выдавать погрешность измерения, составляющую $0,8^{\circ}\text{C}$ и выше. Для повышения точности наблюдений за температурой воздуха и корректировки измерительной аппаратуры необходимо учитывать радиационную погрешность. Для уменьшения этой погрешности предлагается исследовать зависимость защитных свойств радиационного экрана от изменения температурного режима, изменяемого при скорости ветра. С этой целью предлагается использовать метод вычислительной гидродинамики (CFD). Метод CFD реализован для изучения радиационной погрешности естественно вентилируемого радиационного экрана в различных условиях окружающей среды. Наименьшая радиационная погрешность, полученная в результате экспериментов, составляет $0,5^{\circ}\text{C}$ при скорости ветра 2 м/с. Выбранная конструкция «радиационного экрана» хорошо блокирует прямое солнечное излучение и большую часть восходящего излучения. Исследуемая конструкция «радиационного экрана» подходит для применения в климатических системах контроля на территории Крымского полуострова. Дальнейшие исследования и построение имитационной расчетной модели нужно направить на снижение погрешности измерения температуры, вызванного солнечной радиацией.

Ключевые слова: атмосфера, метеорология, климатология.

Поступила в редакцию: 04.02.2024. После доработки: 01.03.2024. Принята к печати: 22.03.2024.

Введение. Точные измерения температуры воздуха, выполняемые наземными метеорологическими станциями, используются в программах климатических исследований для различных целей. Нагрев датчика температуры из-за взаимодействия с окружающей средой может привести к значительным ошибкам. На точность наблюдения датчика температуры влияют многие факторы, включая прямое солнечное излучение, рассеянное излучение, отраженное излучение, восходящее длинноволновое излучение [1]. Таким образом, для точных измерений температуры требуется защита датчика от воздействия прямого и отраженного солнечного излучения, а также контакт датчика с атмосферным воздухом.

Хорошая конструкция устройства, применяемого для мониторинга температуры приземного воздуха, должна сво-

дить к минимуму излучение, достигающее зонда датчика. С другой стороны, поскольку поток воздуха может способствовать распространению лучистого тепла, увеличение скорости воздушного потока вокруг датчика может уменьшить погрешность измерения температуры от излучения. Ошибка измерения температуры, вызванная солнечным излучением, является основным источником ошибок измерений. Чтобы свести к минимуму влияние солнечного излучения, датчик температуры необходимо поместить в «радиационный экран», поглощающий солнечную радиацию. Так же погрешность может снизиться с увеличением скорости прохождения воздушных потоков через «радиационный экран». Следовательно, экран должен иметь конструкцию с отверстиями для поступления и выхода воздушных масс с целью

увеличения скорости ветра внутри экрана.

В идеале экран должен предотвращать нагрев зонда датчика прямыми и отраженными солнечными лучами и обеспечивать достаточный поток воздуха для вентиляции зонда. Тем не менее, отражательная способность экрана не может достигать 100% [1]. Кроме того, зачастую конструкция экрана замедляет циркуляцию воздуха, что снижает скорость отклика датчика температуры. Известны конструкции экрана, состоящие из двух алюминиевых пластин, между которыми расположен зонд датчика [2]. Такая конструкция не в полной мере подходит для использования на территории Крымского полуострова. Это связано с тем обстоятельством, что над территорией Крыма достаточно много случаев преобладающего южного ветра, несущего вместе с воздушными массами мелкие частицы песка. Поэтому конструкция экрана должна обеспечивать по возможности защиту от прямого воздействия таких частиц.

Цель и постановка задач. Исходя из приведенного выше анализа литературных данных, необходимо провести исследование параметров «радиационного экрана» датчика температуры, предполагаемого к применению в наблюдениях за температурой приземного воздуха в условиях, соответствующих климатическим параметрам Крымского полуострова. Для проведения исследования требуется модель, объединяющая и учитывающая все тепловые эффекты. С этой целью для оценки характеристик экрана, предполагается использовать методы вычислительной гидродинамики (CFD).

Материалы и методы. Для исследования была выбрана конструкция «радиационного экрана», представленная на рис. 1.

Чтобы эффективно блокировать прямое солнечное излучение, отраженное излучение и восходящее длинноволновое излучение, конструкция экрана представляет собой набор из верхней крышки, выполненной в виде перевернутой «тарелки», набора «тарелок» с тех-

нологическим отверстием посередине и плоской основы внизу конструкции.

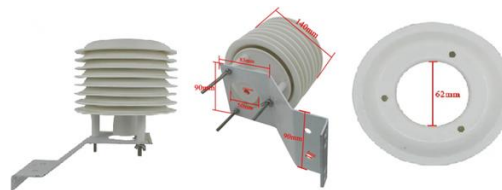


Рис. 1. Вид радиационного экрана с основными технологическими размерами

Fig. 1. View of the radiation screen with the main technological dimensions

Для оценки параметров конструкции экрана было проведено численное моделирование с помощью CFD – пакета ANSYS FLUENT. Этот пакет позволил провести исследования прохождения потока атмосферного воздуха через «радиационный экран» с учетом различных условий окружающей среды.

Чтобы провести исследование с использованием CFD – пакета в начале была создана трехмерная CAD – модель расчетной области, повторяющая по своим характеристикам физическую модель «радиационного экрана». Построение осуществлялось с использованием инструментов, входящих в программный продукт ANSYS FLUENT. Смоделированная расчетная область показана на рис. 2. Толщина стенок «радиационного экрана» выбрана равной 5 мм.

На рис. 2 представлен радиационный экран с окружающей его расчетной областью. Размер воздушной области составляет - 3200 мм×2600 мм×3200 мм.

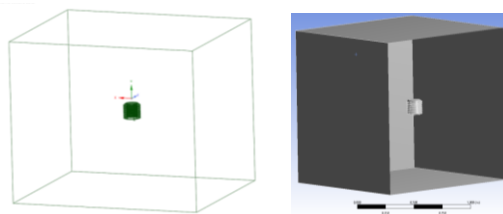


Рис. 2. Расчетная область объекта исследования

Fig. 2. The estimated area of the research object

При создании трехмерной геометрической модели, которая представляет

собой полномасштабную модель «радиационного экрана», детализация выбрана в соответствии с поставленной задачей - определения интегральных тепловых эффектов во внутренней области радиационного экрана и исключения упрощения геометрических форм исследуемого объекта.

Расчетный воздушный домен был сформирован следующим образом: после создания в программном комплексе объемной геометрической модели «радиационного экрана» объем модели «вычитается» из объема воздушного пространства, окружающего экран.

Расчетная область была представлена в виде сетки, состоящей из многогранных элементов с содержанием 158 тысяч ячеек. Для формирования сетки применялся метод построения – «CutCell». Максимальный размер грани сеточного элемента составляет 240 мм. Для разных вычислительных областей задаются разные размеры сетки. Моделирование теплообмена между экраном и воздухом производится с созданием сетки пограничного слоя, позволяющей повысить точность численных расчетов и зафиксировать физические результаты внутри пограничного слоя. В ближней зоне смоделировано сгущение сетки около «радиационного экрана», элементы сетки имеют наименьший размер 1 – 2 мм. Вид расчетной области с визуализацией построения сеточной модели представлен на рис. 3.

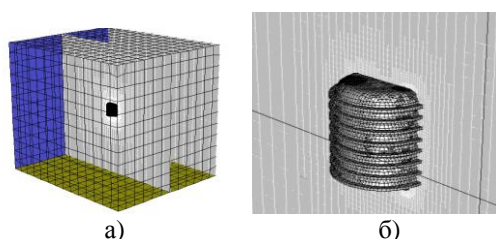


Рис. 3. Сетка конечных элементов: а – общий вид, б – вблизи радиационного экрана

Fig. 3. The grid of finite elements:
а – general view, б – near the radiation screen

Для учёта в модели солнечной радиации используется модель «трассировки солнечных лучей». В CFD-модели ради-

ационного экрана используются стандартный полуявный метод «Semi-Implicit Method» для алгоритма уравнений, связанных с давлением «Pressure-Linked Equations» (SIMPLE); стандартный метод инициализации «standard initialization method». При расчете используется стандартная модель $k-\epsilon$, включающая параметры: C_{μ} , C_1 -эпсилон, C_2 -эпсилон, кинетическую энергию турбулентности (ТКЕ), скорость турбулентного рассеяния (ТДР), число Прандтля и число Прандтля для стенки, которые соответственно равны: 0.09, 1.44, 1.92, 1, 1.3, 0.85 и 0.85.

Определение параметров импульса, энергии и турбулентности осуществлялось с использованием метода «схема адвекции первого порядка».

Для обеспечения достоверности результатов CFD-моделирования граничные условия устанавливались в соответствии с физической средой, включая отражающую способность поверхности Земли и «радиационного экрана» [3].

Области расчета присваивались следующие физические параметры среды: – несжимаемый воздух при температуре (20°C) и давлении 1 атм. с учетом силы гравитации. Температура среды была выбрана из анализа литературных источников по проведению экспериментов в данной области [2–4].

Параметры солнечного излучения (как значения по умолчанию) задавались следующим образом: интенсивность солнечного излучения - 898 Вт/м², интенсивность рассеянного излучения - 72 Вт/м², интенсивность восходящего длинноволнового излучения - 99 Вт/м², угол возвышения Солнца - 90°, и отражающая способность подстилающей поверхности – 0.2 соответственно. Вышеперечисленные параметры являются основными факторами, влияющими на точность наблюдения температуры атмосферы.

В расчетной области задавались следующие граничные условия:

1. В качестве характеристик набегающего потока (граничное условие на «входе» (INLET)) задавался профиль скорости ветра и характеристика турбу-

лентности (кинетическая энергия турбулентности и энергии диссипации, интенсивность турбулентности и масштаб вихря).

Для исследования был проведен анализ и выбраны данные о климатических параметрах, связанных со штилевыми явлениями, как наиболее худшим условием для снижения «радиационной ошибки». К таким данным можно отнести скорость ветра от 0,5 до 2 м/с.

2. На «выходе» (OUTLET) назначались «мягкие» граничные условия с нулевыми дополнительными давлениями и такими же параметрами турбулентности, как и на «входе». Граничные условия и расчетная область с обозначенными граничными условиями приведены на рис. 2.

3. На верхней границе области задавалось условие «симметрии».

4. На нижней границе области задавалось условие «стенки» (WALL), исключающее проникновение вещества через поверхность.

5. На область «радиационного экрана» задавалось условие «стенки». Параметр «коэффициент теплопередачи» был выбран по результатам моделирования при естественной конвекции и составляет 1 Вт/(м²·К) (рис. 4). В качестве начального условия - температура радиационного экрана была принята 23°C, а температура окружающей среды 20°C.

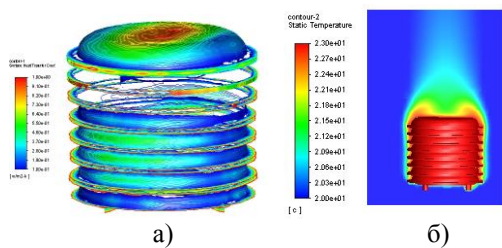


Рис. 4. Результаты моделирования а) значения естественной конвекции от радиационного экрана; б) поле температуры при естественной конвекции
Fig. 4. Simulation results: a) values of natural convection from the radiation shield; b) temperature field during natural convection

Численное моделирование теплопередачи при взаимодействии «воздушный

поток - твердое тело» выполнялось с использованием CFD-метода.

Свойства материалов радиационной защиты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства материалов радиационной защиты

Материал	Плотность, (кг/м ⁻³)	Теплопроводность, Вт/(м·град)	Теплоёмкость, Дж/(кг·град)
ABS пластик	1030	0,13	1300

Результаты моделирования температурного поля радиационного экрана при условиях по умолчанию показаны на рис. 5. Из рис. 5 видно, что наибольшая температура зафиксирована на верхней части экрана, что соответствует физическому условию солнечного нагрева.

Конструктивно устройство «радиационного экрана» выполнено с условием послойного поступления воздушного потока, элементы экрана могут нагреваться различными типами излучениями в свою очередь вызывать нагрев свободного воздуха, проходящего между нагретыми поверхностями.

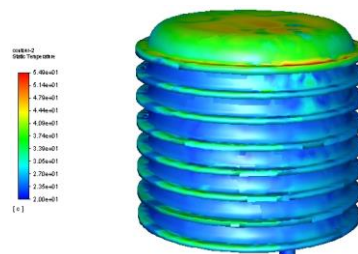


Рис. 5. Результаты моделирования температурного поля поверхностей естественно вентилируемого «радиационного экрана»
Fig. 5. The results of modeling the temperature field of the surfaces of a naturally ventilated "radiation shield"

Это явление называется тепловым загрязнением, вызывающим погрешность измерения датчика.

Результаты расчета (в зависимости от изменения скорости окружающего «радиационный экран» атмосферного воздуха) полей температуры внутри и на поверхности радиационного экрана, а

также скорости потока показаны на рис. 6–9.

Проходящий воздушный поток способствует рассеиванию лучистого тепла и уменьшению погрешности излучения. Анализ результатов расчетов показывает, что скорость воздушного потока внутри экрана при внешней скорости ветра 0.5 м/с составляет приблизительно 0.4 м/с (рис. 6б).

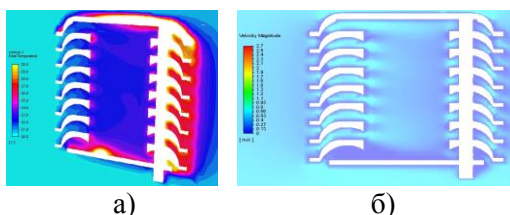


Рис. 6. Результаты расчета полей температуры (а) и скорости (б) внутри области радиационного экрана при внешней скорости 0.5 м/с
Fig. 6. The results of calculating the temperature (a) and velocity (b) fields inside the radiation shield area at an external velocity of 0.5 m/s

Поскольку в радиационном экране присутствует полость, в которой происходит замедление скорости потока, тепловое загрязнение является высоким. Погрешность измерения температуры составляет 2°C (рис. 6а).

При повышении скорости воздушного потока до 1 м/с увеличивается скорость воздушного потока внутри экрана до 0.66 м/с (рис. 7б). Следовательно, погрешность измерения излучения уменьшается и составляет 1°C (рис. 7а).

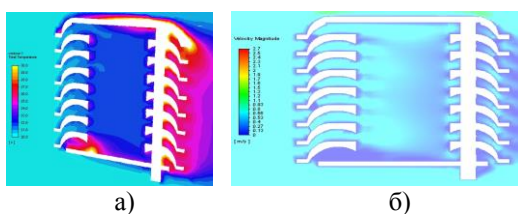


Рис. 7. Результаты расчета полей температуры (а) и скорости (б) внутри области радиационного экрана при внешней скорости 1 м/с
Fig. 7. The results of calculating the temperature (a) and velocity (b) fields inside the radiation shield region at an external velocity of 1 m/s

Дальнейшее увеличение скорости воздушного потока ожидаемо приводит к повышению внутренней скорости потока до 0.8 м/с (рис. 8б), проблема теплового загрязнения становится меньше, но все еще имеет высокие значения. Погрешность излучения уменьшилась до 0.6°C (рис. 8а).

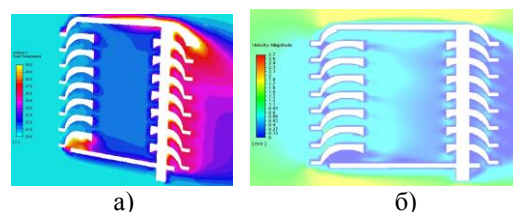


Рис. 8. Результаты расчета полей температуры (а) и скорости (б) внутри области радиационного экрана при внешней скорости 1.5 м/с
Fig. 8. The results of calculating the temperature (a) and velocity (b) fields inside the radiation shield area at an external velocity of 1.5 m/s

Увеличение скорости ветра вокруг радиационного экрана до 2 м/с приводит к повышению внутренней скорости потока до 0.93 м/с (рис. 9б). Погрешность излучения уменьшилась до 0.5°C (рис. 9а).

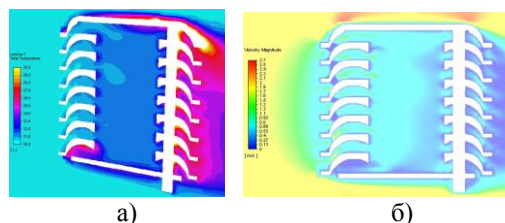


Рис. 9. Результаты расчета полей температуры (а) и скорости (б) внутри области радиационного экрана при внешней скорости 2 м/с
Fig. 9. The results of calculating the temperature (a) and velocity (b) fields inside the radiation shield region at an external velocity of 2 m/s

Из анализа вышеперечисленных результатов можно сделать вывод, что выбранная конструкция «радиационного экрана» удовлетворительно защищает от солнечного излучения и снижает ошибку измерения температуры при внешней скорости ветра более 2 м/с.

Прямое солнечное излучение значительно влияет на погрешность измерения температуры, в связи с этим важную роль играет материал конструкции, её устройство, усиливающие блокировку значительной части прямого солнечного излучения, что видно из температурных профилей внутри радиационного экрана и его верхней наружной поверхности.

Заключение. Из анализа результатов можно сделать вывод, что выбранная конструкция «радиационного экрана» хорошо блокирует прямое солнечное излучение. Нижняя «тарелка» хорошо может блокировать большую часть восходящего длинноволнового излучения, предполагается, что изменение восходящего длинноволнового излучения практически не влияет на погрешность измерения.

В ходе последующих исследований имитационная расчетная модель нуждается в дальнейшем совершенствовании, чтобы привести ее в большее соответствие с реальной физической средой. Кроме того, необходимо выбрать более подходящий материал с низкой теплопроводностью и высоким отражением солнечного света, высокой водонепроницаемостью и коррозионной стойкостью. Выбранная конструкция «радиационного экрана» подходит для применения в климатических системах контроля на территории Крымского полуострова.

Исследование выполнено частично в рамках государственного задания Института природно-технических систем по теме «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия» (№ госрегистрации 124013000609-2).

Работа выполнена при поддержке города Севастополь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anderson S.P., Baumgartner M.F. Radiative heating errors in naturally ventilated air temperature measurements made from buoys. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1998. V. 15. No. 1. P. 157–173.
2. Yang J., Liu Q., Chen G., Deng X. Optimized design and experimental validation of a temperature sensor for surface air temperature observation. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. P. 112646.
3. Yang J., Deng X., Liu Q., Ding R. Design and experimental study of an effective, low-cost, naturally ventilated radiation shield for monitoring surface air temperature. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2021. V. 133. No. 2. P. 349–357.
4. Dai W., Tan M., Zhu H. Design of a radiation shield applied to surface air temperature monitoring. *Journal of Instrumentation*, 2023, 18. P02015. 10.1088/1748-0221/18/02/P02015.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF RADIATION SCREEN APPLICATION OF THE AMBIENT AIR TEMPERATURE SENSOR

A.A. Egorkin^{1,2}, V.P. Evstigneev^{1,2}, S.Y. Samoilov²

¹Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

²Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

Special sensors are used to measure the surface temperature of the environment. The rate of global change in surface air temperature is about 0.2°C per decade. Due to the effects of solar radiation, modern air temperature sensors inside a naturally ventilated radiation shield can produce a measurement error of 0.8°C or higher. To improve the accuracy of observations of air temperature and adjust the measuring equipment, it is necessary to take into account the radiation error. To reduce this error, it is proposed to investigate the dependence of the protective

properties of the radiation shield on changes in the temperature regime, which changes at wind speed. For this purpose, it is proposed to use the computational fluid dynamics (CFD) method. The CFD method is implemented to study the radiation error of a naturally ventilated radiation shield under various environmental conditions. The lowest radiation error obtained as a result of the experiments is 0.5°C at a wind speed of 2 m/s. The chosen design of the "radiation shield" blocks the direct solar radiation and most of the upward radiation well. The studied design of the "radiation shield" is suitable for the use in climate control systems on the territory of the Crimean Peninsula. Further research and the construction of a simulation calculation model should be aimed at reducing the temperature measurement error caused by solar radiation.

Keywords: atmosphere, meteorology, climatology.

REFERENCES

1. Anderson S.P. and Baumgartner M.F. Radiative heating errors in naturally ventilated air temperature measurements made from buoys. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, Vol. 15, No. 1, pp. 157–173.
2. Yang J., Liu Q., Chen G., and Deng X. Optimized design and experimental validation of a temperature sensor for surface air temperature observation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, P. 112646.
3. Yang J., Deng X., Liu Q., and Ding R. Design and experimental study of an effective, low-cost, naturally ventilated radiation shield for monitoring surface air temperature. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2021, Vol. 133, No. 2, pp. 349–357.
4. Dai W., Tan M., and Zhu H. Design of a radiation shield applied to surface air temperature monitoring. *Journal of Instrumentation*, 2023, 18. P02015. 10.1088/1748-0221/18/02/P02015.