

# ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА НА ПРОЦЕСС КОНВЕКЦИИ В СОЛНЕЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ

THE INFLUENCE OF THE ANGLE OF INCLINATION ON THE CONVECTION PROCESS IN THE SOLAR COLLECTOR

[Жумаев Ж. Рамазонава М.И.](#)

24.12.2024 15

[12\(129\)](#)

[03. Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение](#)

## Цитировать:

Жумаев Ж., Рамазонава М.И. ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА НА ПРОЦЕСС КОНВЕКЦИИ В СОЛНЕЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ // *Universum: технические науки* : электрон. научн. журн. 2024. 12(129). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18934> (дата обращения: 25.12.2024).

## АННОТАЦИЯ

Влияние угла наклона коллектора на процесс конвекции исследовано путем математического моделирования процессов распределения тепла и естественной конвекции в плоском солнечном коллекторе. При нагреве воздуха под воздействием солнечной радиации предполагалось, что движение воздуха в плоском коллекторе будет ламинарным. Для моделирования течения естественной конвекции воздуха была выбрана система нестационарных дифференциальных уравнений, основанная на законах сохранения массы, импульса и энергии в приближении Бюссинеска. За граничное условие принималась средняя температура в течение дня. Система безразмерных уравнений решалась методом конечных разностей и явной схемы.

## ABSTRACT

The influence of the collector tilt angle on the convection process has been investigated by mathematical modeling of heat distribution and natural convection processes in a flat solar collector. When heating the air under the influence of solar radiation, it was assumed that the air movement in the flat collector would be laminar. A system of nonstationary differential equations based on the laws of conservation of mass, momentum, and energy in the Bussinesque approximation was chosen to simulate the flow of natural air convection. The average temperature during the day was taken as the boundary condition. The finite difference method and an explicit scheme solved the dimensionless equations system.

**Ключевые слова.** Солнечный коллектор, конвекция, математическое моделирование, уравнение в частных производных, аппроксимация Бюссинеска, численный метод, явная конечно-разностная схема.

**Keywords.** Solar collector, convection, mathematical modeling, partial differential equation, Bussinesque approximation, numerical method, explicit finite difference scheme.

## ВВЕДЕНИЕ

В солнечных сушилках с естественной циркуляцией воздуха существует режим конвекции, комплексное изучение таких процессов которой является весьма актуальной проблемой гидромеханики и теплопередачи, поскольку они часто встречаются во многих практических задачах, связанных с эффективным использованием возобновляемых источников энергии. Актуальность темы отражена в ряде связанных с ней научных работ.

Исследование авторов [1] было сосредоточено на анализе температурного режима, характеристик теплопередачи и термического КПД плоского солнечного коллектора (ППСС) в различных массовых потоках воздуха. Связь между несколькими другими переменными была установлена с помощью многомерного анализа исследования.

Анализ основных параметрических составляющих позволил визуализировать связь между интенсивностью солнечной активности, температурой в различных элементах резервуара, коэффициентами теплопередачи, тепловым КПД и временем суток. Результаты показали, что полезный приток тепла, коэффициент теплопередачи воздуха и тепловой КПД коллектора не сильно зависят от интенсивности солнечной радиации.

Авторы [2] провели численный анализ исследования конвективного течения вязкой и несжимаемой жидкости по наклонной полубесконечной пластине с учетом температурной зависимости вязкости и тепловыделения. Подбираются уравнения с соответствующими граничными условиями, которые преобразуются в безразмерную форму с помощью соответствующих безразмерных величин. Ввиду невозможности получения аналитического решения предложенных уравнений, сложности их преобразования в математической модели авторы использовали схему Кранка-Николсона как наиболее эффективный и безусловно устойчивый конечно-разностный метод получения решения.

В статье авторов [3] моделируется процесс формирования динамических и температурных пограничных слоев вблизи вертикально расположенного стержня как источника тепла.

Система стационарных дифференциальных уравнений в частных производных формируется на основе приближения пограничного слоя и с учетом сжимаемости среды.

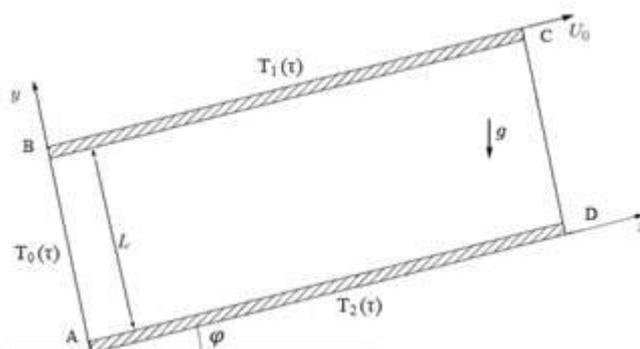
Задача, связанная с граничными условиями, решалась численно по неявной схеме с использованием метода прогонки и итераций. Были найдены профили скорости и температуры для различных значений числа Прандтля и граничных условий. Отмечается,

что результаты исследований могут быть использованы для изучения процесса конвекции вблизи источников тепла.

Из анализа результатов приведенной литературы можно сделать вывод о необходимости изучения влияния случаев с разными углами наклона на процесс конвекции в плоских коллекторах с естественной конвекцией воздуха.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Задачу конвекции на наклонном плоском коллекторе мы сводим к задаче исследования конвекции воздуха между двумя параллельными стержнями (рис. 1) [4,5,6]. При решении уравнений, предложенных авторами этих статей, возникают проблемы при учете изменения динамической вязкости, коэффициента теплоотдачи, изменения плотности воздуха. Эти величины необходимо учитывать при изучении многих процессов распространения тепла при больших перепадах температур. А в тех случаях, когда разница температур невелика, эти параметры можно принять постоянными. Но чтобы учесть движение при конвекции, всегда необходимо учитывать изменение плотности теплоносителя (воздуха).



*Рисунок 1. Схема коллектора в координатной плоскости*

Исходя из этих предположений, мы считаем, что движение ньютоновской жидкости (воздуха) в коллекторе двумерное и ламинарное и для этого процесса подходит приближение Буссинеска для формулировки уравнений движения и теплоты.

Согласно приближению Буссинеска считаем все свойства жидкости (воздуха) постоянными, кроме плотности воздуха, и предполагаем, что плотность воздуха линейно зависит от температуры [7,8]:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 - \beta \cdot (T - T_0)] \quad (1)$$

Здесь  $\rho_0$  – плотность пространства при начальной температуре,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $\beta$  – коэффициент расширения воздуха,  $\beta = 0.003 \frac{1}{\text{K}}$ ;  $T_0$  – Начальная температура воздуха, который входит в коллектор,  $^{\circ}\text{C}$ .

При формировании начальных условий будем считать, что движение воздушного потока внутри коллектора еще не началось.

Этот процесс можно записать в виде следующей системы дифференциальных уравнений в частных производных в приближении Буссинеска, записанной в безразмерном виде [9-13]:

$$\begin{cases} \frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(\theta)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \vartheta \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\sqrt{Gr}} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \theta \cdot \sin\varphi \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + \vartheta \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr \cdot \sqrt{Gr}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \end{cases}, \quad (2)$$

Здесь  $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2 m}$  – число Gragofa;  $\Delta T = T_h - T_0$  – разница температур,

$\theta = \frac{T - T_0}{T_h - T_0}$  – безразмерная температура,  $T_h$  – температура источника в коллекторе,  $T_0$  – минимальная температура в коллекторе.

**Формирование граничных условий.** Для формирования граничных условий обращаемся к рисунку 1. Считаем, что источник тепла-стержень установлен в части ВС параллельно оси координаты  $x$ . Если температура стержня выше температуры окружающего воздуха, то температура в коллекторе со временем начинает повышаться, и возникает конвекция, поскольку каналы АВ и CD открыты.

Система уравнений (1) решалась численно явным методом путем преобразования ее к конечным разностям на основе граничных условий табл. 1 [15,16]. Графики получены с использованием системы MathCAD [14,17].

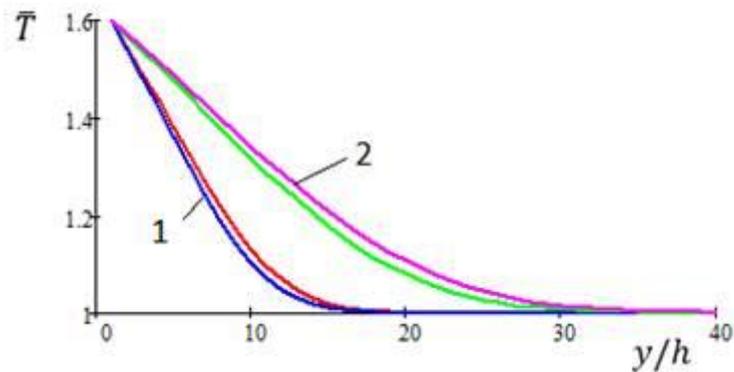
**Таблица 1.**

**Граничные условия**

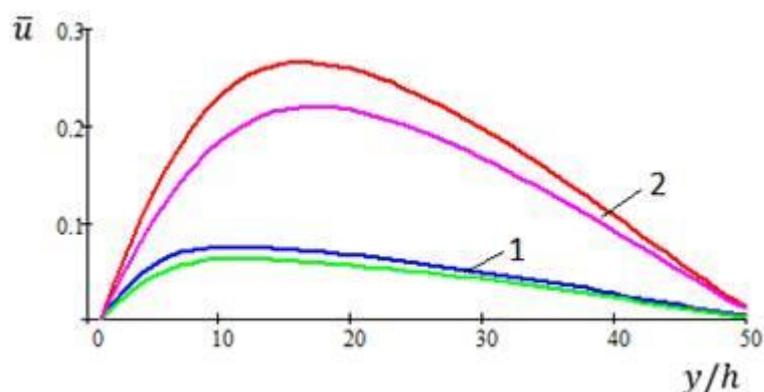
Граничные условия	$u$	$\vartheta$	$T$
Для отрезки АВ  (Рис.1)	$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$	$\vartheta = 0$	$T = T_0(\tau)$

Для отрезки BC (Рис.1)	$u = 0$	$\vartheta = 0$	$T = T_1(\tau)$
Для отрезки CD (Рис.1)	$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$
Для отрезки DA (Рис.1)	$u = 0$	$\vartheta = 0$	$T = T_2(\tau)$

На рисунке 2 приведена безразмерная распределения температуры по радиальному сечению в начале и конце коллектора, когда он расположен вертикально и наклоном на  $45^\circ$ . Как видно из рисунка, температура в наклонном коллекторе будет выше чем в вертикальном.



**Рисунок 2. Распределение температуры в конце коллектора, когда он расположен вертикально и наклоном на  $45^\circ$ . 1- начало коллектора, 2- в конце коллектора, нижняя линия в случае, когда коллектор расположен вертикалу, верхняя линия наклонно на  $45^\circ$**



**Рисунок 3. Распределение безразмерной скорости в начале и в конце коллектора, верхние линии в вертикальном положении, нижние-в наклонном положении**

На рисунке 3 показано безразмерное распределение скоростей в начале и конце коллектора, когда он расположен вертикально и наклонен под углом  $45^{\circ}$ . Из диаграммы видно, что уклон вызывает снижение скорости в коллекторе.

### ВЫВОДЫ

В данной работе представлен процесс конвекции в коллекторе, нагретым источником под определенным углом, полученный путем численного решения уравнений в частных производных Навье-Стокса в приближении Буссинеска с использованием явных конечно-разностных схем.

При наличии источника с высокой температурой через расчеты изучалось влияние наклона коллектора на конвекцию. Установлено, что если наклон коллектора приводит к незначительному повышению температуры в коллекторе, то скорость воздуха снижается. Эту математическую модель можно использовать для изучения процесса конвекции в плоских солнечных коллекторах. А также усовершенствовать модель с условиями скольжения возле стенки.

### Список литературы:

1. Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р.Л., Саммакия Б. Свободно-конвективные течения, тепло и массообмен. Кн. 2. - М.: Мир, 1991. - 678с.
2. Жумаев Ж., Опокина Н.А. Решение математических задач в пакетах математических программ Maxima и MathCAD. Электронный учебник. Казань: КФУ, 2021. – 228 с. <https://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/163784>.
3. Жумаев Ж., Усмонова Г.М. Компьютерное моделирование процесса конвекции вблизи вертикально расположенного источника// UNIVERSUM: Технические науки. Научный журнал. Выпуск 5(74). Май, 2020. С. 41-45.

4. Палани Г., Кирубавати Дж. Д., Кван Ёнг Ким. Свободная конвекция на наклонной пластине при изменениях вязкости и температуропроводности// Теплофизика и аэромеханика, 2014, том 21, № 1.
5. Augustus Leon A., Kumar S. Mathematical modeling and thermal performance analysis of ungrazed solar collectors// Solar Energy 81 (2007) 62–75. [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)
6. Poonam Rani, P.P. Tripathy. Thermal characteristics of a flat plate solar collector: Influence of air mass flow rate and correlation analysis among process parameters// Solar Energy 211 (2020) 464–477.
7. Jumayev J., Mustafakulov Ya., Kuldashev H. Numerical algorithm for modeling turbulence in a jet with diffusion combustion//2020 IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication technologies (AICT). 7-9 okt. 2020. DOI 10.1109/AICT50176.2020.9368857
8. Jumayev J., Shirinov Z., Kuldashev H. Computer simulation of the convection process near a vertically located source// International conference on Information Science and Communication Technologies (ICISCT). 2019. DOI:10.1109/ICISCT47635.2019. 9012046.
9. Kaushik A. Numerical Solutions for Free Convection Flow past a Vertical Cone using Alternating Direction Implicit (ADI) Technique. //International Journal of Research and Innovation in Applied Science (IJRIAS) | Volume V, Issue VI, - June 2020 P. 28-34.
10. Karthikeyan S., Sundararajan T., Shet U.S.P., Selvaraj P. Effect of turbulent natural convection on sodium pool combustion in the steam generator building of a fast breeder reactor // J. Nuclear Engng and Design.2009. Vol. 239, No. 12. P. 2992–3002.
11. Kholikov A.A., Jumayev J. Planning and conducting experiments of the drying process using heat pipes// European Scholar Journal(ESJ),Vol.2, No.3, March 2021, p.36-41.
12. Lin W., Armfield S.W. Direct simulation of natural convection cooling in a vertical circular cylinder //Inter. J. of Heat and Mass Transfer. 1999. Vol. 42. P. 4117–4130.
13. Narziev M., Jumaev J. Simulation of mixing and crushing of liquid at the initial site by a high-temperature gas flow// E3S Web of Conferences 390, 05023 (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339005023>
14. Palani G., Kumar E.J.I., Kim K.-Y. Free Convection Effects on a Vertical Cone with Variable Viscosity and Thermal Conductivity. //Прикладная механика и техническая физика. Издательство Сибирского отделения РАН. Том-57, № 3, 2016. С. 96-107.
15. Poonam Rani, P.P. Tripathy. Thermal characteristics of a flat plate solar collector: Influence of air mass flow rate and correlation analysis among process parameters// Solar Energy 211 (2020) 464–477. [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener).
16. Rodriguez I., Castro J., Perez-Segarra C.D., Oliva A. Unsteady numerical simulation of the cooling process of vertical storage tanks under laminar natural convection // Inter. J. of Thermal Sci. 2009. Vol. 48, No. 4. P. 708–721.