

ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ ВОЗДУХА В ГЕЛИОУСТАНОВКАХ

Б.Э. Хайриддинов¹, С.М. Хужакулов², И.Л. Ньматов³ Э.М.Мейлиев¹

¹Каршинский государственный университет

²Каршинский инженерно-экономический институт

³Шахрисабзский военно-академический лицей “Темурбеклар мактаби”

<https://doi.org/10.5281/zenodo.10216015>

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы теплообмена и процессы температурной стратификации воздуха в замкнутом объеме гелиоустановки. На основе опытных данных, полученных в гелиотеплице, выведена корреляционная зависимость, определяющая изменение температуры воздуха по её высоте.

Ключевые слова: гелиотеплица, конвекция, стратификация, тепло- и массообмен, температура, давление, плотность, влажность воздуха, концентрация, материал сушки.

HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES AND TEMPERATURE STRATIFICATION OF AIR IN SOLAR INSTALLATIONS

Abstract: The work examines the issues of heat and mass transfer and the processes of temperature stratification of air in a closed volume of a solar installation. Based on experimental data obtained in a solar greenhouse, a correlation dependence was derived that determines the change in air temperature along its height.

Keywords: solar greenhouse, convection, stratification, heat and mass transfer, temperature, pressure, density, air humidity, concentration, drying material.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно в процессах естественной конвекции в замкнутых объёмах существует теплообменные процессы и стратификация среды [1], когда менее плотные слои располагаются над более плотными слоями. В процессах тепло и массопереноса возникает как температурная, так и концентрационная стратификация. Изменение температуры среды приводит к изменению её плотности, более тёплый объём поднимается вверх, более холодный – вниз. Концентрационная стратификация обусловлена разностью концентрации среды.

В низкотемпературных солнечных установках (теплицах, сушилках, опреснителях) практически всегда существует температурная стратификация. В дневное время в период инсоляции, солнечная радиация прогревает внутренние поверхности установки (почву, ограждения, растения в теплице, материал сушки в сушилке).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Естественной конвекцией тепло передается воздушной среде. Эти процессы в замкнутом объеме конструкции приводят к температурной стратификации воздуха по высоте конструкции. В ночное время стратификация сохраняется, с понижением температуры степень стратификации снижается.

Некоторое нарушение стратификации вызывает естественная аэрация и принудительная вентиляция, инфильтрация и эксфильтрация воздуха в конструкции. Естественная конвекция вновь приводит к стабилизации. Условие существования устойчивой стратификации определяется убыванием плотности среды по вертикали:

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} < 0. \quad (1)$$

Влажный воздуха рассматривается как смесь идеальных газов, состоящая из сухого воздуха и перегретого пара (при ненасыщенном воздухе) или насыщенного пара (при насыщенном воздухе). В общем виде плотность влажного воздуха среды является функцией температуры t , давления p и концентрации пара C :

$$\rho = f(t, p, C). \quad (1a)$$

В условиях гелиоустановок барометрическое давление принимается постоянным $p = \text{const}$. Тогда зависимость разности плотностей, определяющих Архимедову силу выталкивания, от совместного действия переноса тепла и концентрации можно представить в следующем виде

$$\Delta \rho = \Delta \rho_t + \Delta \rho_C = \rho_0 \cdot \beta \cdot (t - t_h) + \rho_0 \cdot \beta_C \cdot (C - C_h), \quad (2)$$

где $\rho_0 = \rho(t, C)$ – выбранная плотность среды, относительно которой определяется выталкивающая сила, $\rho_h = \rho(t_h, C_h)$ – рассматриваемая плотность.

В низкотемпературных гелиоустановках в процессах переноса, изменение плотности в зависимости от t и C можно принять линейным. Тогда коэффициенты температурного β , и концентрационного β_C расширений среды определяются следующими выражениями:

$$\beta_t = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{p,C}; \quad \beta_C = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial C} \right)_{p,t}. \quad (3)$$

Для идеальных газов $\beta_t = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273,15}$ (3a)

Из выражений (3) и (3a) получим

$$\beta_C = \frac{1}{C - C_y} \cdot \left(\frac{\rho_0 - \rho_y}{\rho_0} - \frac{t - t_y}{273,15} \right). \quad (3b)$$

Если известны температура, давление и относительная влажность воздуха, плотность воздуха определяется следующими выражениями [2]:

$$\rho = \frac{p \cdot \mu}{R \cdot T}; \quad T = 273,15 + t; \quad \mu = 28,95 - 10,93 \frac{\varphi \cdot p_h}{p}; \quad (4)$$

где p – барометрическое давление, Па; μ – молекулярная масса влажного воздуха, кг/кмоль; $R=8314$ Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная; φ – относительная влажность воздуха; p_h – давление насыщения пара, Па.

В интервале температур $T=303-343$ К давление насыщения [3]

$$p_h = 4245,29 \cdot \exp \left[5201,3 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]. \quad (5)$$

Влагосодержание воздуха x (г/кг) и концентрация пара C (кг/кг) [3]

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_h}{p - p_h}; \quad C = \frac{x}{1000}. \quad (6)$$

В соответствии с формулами (4) и (5), с увеличением температуры при $\varphi = \text{const}$ плотность воздуха падает практически линейно (рис.1). Таким образом

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -grad \rho \quad (7)$$

и Архимедова сила при $\frac{\partial \rho}{\partial t} = grad t$ – направлена вверх;

при $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -grad t$ – направлена вниз.

При равных условиях t и p плотность сухого воздуха больше плотности водяного пара. При увеличении влагосодержания плотность воздуха также линейно убывает (рис. 1.2). Аналогично (7) можно записать

$$\frac{\partial \rho}{\partial C} = -grad \rho \quad (7a)$$

и Архимедова сила при $\frac{\partial C}{\partial h} = grad C$ направлена вверх;
при $\frac{\partial C}{\partial h} = -grad C$ – направлена вниз.

Температурный градиент плотности сухого воздуха в интервале $t=20-70$ °C составляет:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -0,0034 - 0,00494 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \quad (8)$$

Концентрационный градиент плотности влажного воздуха в интервале $C=(10-110)/10^3$ кг/кг ($x=10-110$ г/кг) составляет:

$$\frac{\partial \rho}{\partial C} = -\frac{0,00047-0,01}{10^3} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right), \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right) \quad (8a)$$

Как видно из (8) и (8a), температурный градиент плотности превышает концентрационный в 10^3 раз. Поэтому, можно принять, что основное изменение плотности влажного воздуха определяется изменением температуры $\rho_h = \rho(t)$. В практических расчетах в формуле (2) можно не учитывать $\Delta \rho_c$.

Таким образом, для возникновения стратификации достаточно выполнения следующего условия

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} > 0 \quad (9)$$

Соотношения (1) и (9) являются условиями устойчивости стратификации, в процессах тепло- и массопереноса. В низкотемпературных солнечных установках достаточно учитывать только температурную стратификацию. Традиционно при исследовании тепло- и массопереноса в процессах сушки в солнечных сушильных установках используется объёмная модель, где принимаются средние по объёму значения параметров в сушильной камере [4,5]. В общем виде теоретически такой подход достаточно полно отражает процессы, протекающие в сушильной камере.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Реальности материал сушки располагается в несколько слоев на стеллажах тележках (рис. 3). Процессы тепло- и массопереноса происходят только в объёме слоя расположения материала сушки. В промежутках между стеллажами и вне тележки эти процессы отсутствуют, и происходит только стратификационная стабилизация среды. В условиях естественной конвекции стратификация среды оказывает влияние на процессы тепло- и массопереноса в зависимости от расположения слоя материала по вертикали. В свою очередь процессы тепло- и массопереноса влияют на стратификационное расслоение среды.

Как показывает опыт эксплуатации гелиосушилок, вертикальная стратификация наиболее выражена и устойчива (рис. 3,4), нарушение температурной стратификации по длине конструкции практически отсутствует, по ширине нарушение температурной стратификации наблюдается вблизи ограждений и вентиляционных форточек. Для реального описания процессов сушки необходимо иметь модель тепло- и массопереноса, с учетом послойного расположения материала сушки и температурной стратификации среды. Реализация такой модели позволит более достоверно определить условия сушки и адекватность объёмной модели, описания процессов сушки.

ВЫВОДЫ

Изменение температуры воздуха по высоте можно представить следующей корреляционной зависимостью

$$t_0 = t_m - (t_m \cdot a); \quad t_h = t_0 \exp(b \cdot h) \quad (10)$$

t_0 - температура воздуха при $h=0$ м; t_m - среднemasовая температура воздуха, измеряемая на высоте $h = 1,5 - 1,7$ м; a, b - коэффициенты, определяемые экспериментально.

На основе регрессионного анализа среднестатистических экспериментальных данных получены следующие значения коэффициентов

$$a = 0,0425; b=0,029 \quad (10a)$$

Таким образом, при многослойной модели сушки, для каждого слоя граничные условия будут иметь вид:

на входе в слой $h_n = h_i$; $t_n = t_0 \exp(b \cdot h_n)$;

на выходе из слоя $h_k = h_i + d$; $t_k = t_0 \exp(b \cdot h_k)$,

(11)

где h_i – высота расположения стеллажа с материалом сушки, м; d – высота слоя, средний эквивалентный размер материала сушки, м.

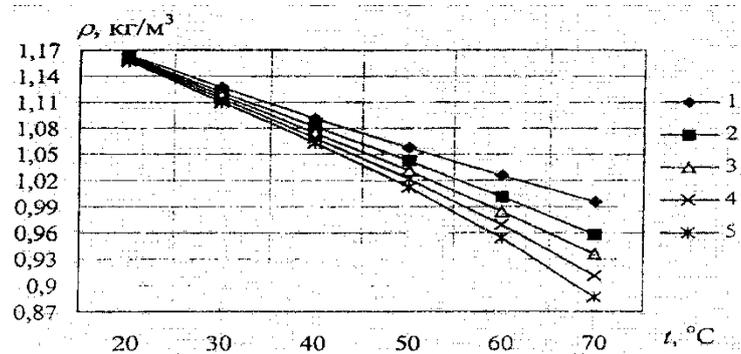


Рис.1. Изменение плотности воздуха с изменением температуры:

$\rho = \rho(t)$ при 1- $\phi=0$; 2- $\phi=30\%$; 3- $\phi=50\%$; 4- $\phi=70\%$; 5- $\phi=90\%$.

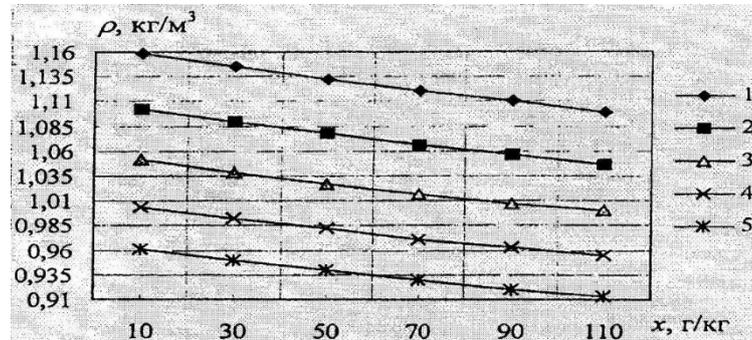


Рис.2. Изменение плотности воздуха с изменением влагосодержания:

$\rho = \rho(x)$ при 1- $t=20^\circ\text{C}$; 2- $t=35^\circ\text{C}$; 3- $t = 50^\circ\text{C}$; 4- $t=65^\circ\text{C}$; 5- $t=80^\circ\text{C}$

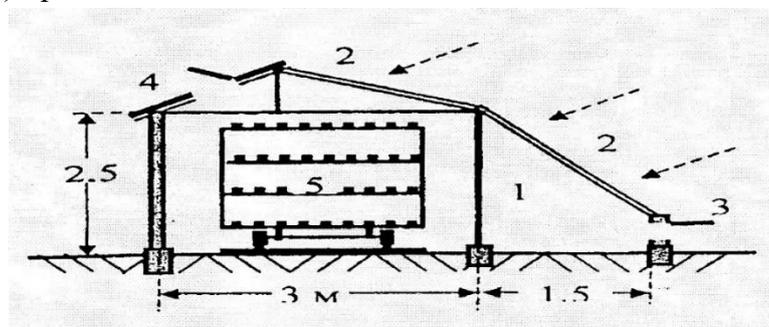


Рис.3. Схема поперечного сечения гелиосушилки: сушильная камера-воздухонагреватель, 2- стеклянное ограждение, 3- нижние и 4- верхние вентиляционные форточки, 5- тележки-стеллажи с материалом сушки

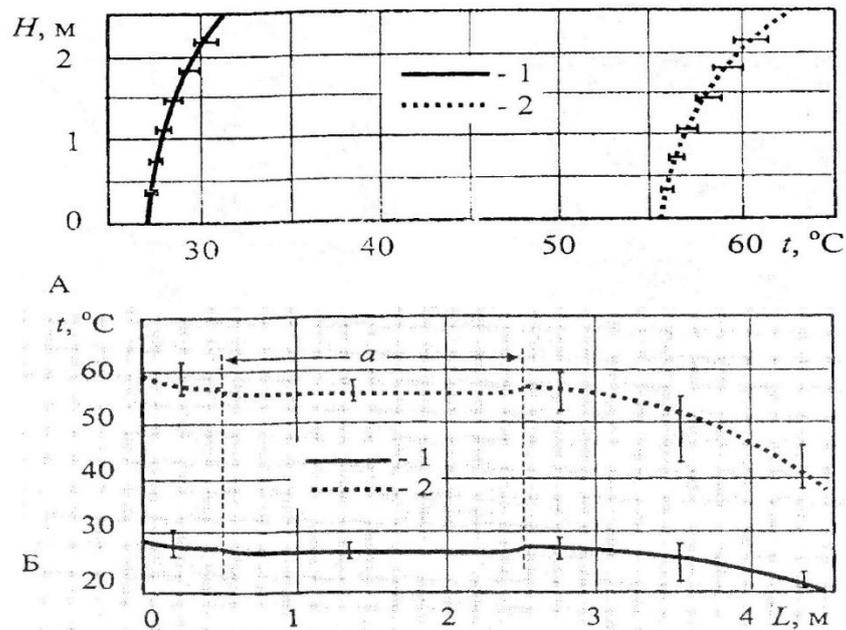


Рис.4. Среднестатистическое изменение температуры воздуха в гелиосушительной установке (август): А- по высоте на расстоянии $L=3$ м; Б- по длине на высоте $H = 1,6$ м; 1- Минимальное в 6 часов; 2- максимальное в 14 часов; a - место расположения тележек-стеллажей.

Литература

1. Джалурия И. Естественная конвекция./М.: Мир, 1983, 399 с.
2. Крум Д. Кондиционирование воздуха и вентиляция зданий./М.: Стройиздат, 1980, 395 с.
3. Богословский В.Н., Поз М.Я. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. /М.: Стройиздат, 1983, 317 с.
4. Ким В.Д., Хайридинов Б.Э., Холлиев Б.Ч. Естественная - конвективная сушка плодов в солнечных сушительных установках: практика и теория. /Т.: Фан, 1999, 378с.
5. Хайридинов Б.Э., Халимов Г.Г. Нурматова Д.Ж. Математическая модель взаимосвязанного тепло- и массопереноса при конвективной сушке влажного материала при заданном законе изменения температуры теплоносителя. //Научно-технический журнал ФерПИ, 2018, Том 22, №2, С.73-78