

ISBN: 978-93-26635-23-2

# РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБИНИРОВАННОЙ СУШИЛКИ



**Х. НУРИДДИНОВ,  
Ж.Ж.КУЧКАРОВ**



Published by  
**Novateur Publication**  
466, Sadashiv Peth, M.S.India-411030  
[novateurpublication.org](http://novateurpublication.org)

**Х. НУРИДДИНОВ,  
Ж.Ж.КУЧКАРОВ**

**РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
КОМБИНИРОВАННОЙ СУШИЛКИ.**

Бухара -2023

**МИНИСТЕРСТВО ВЫШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
УЗБЕКИСТАН**

**БУХАРСКИЙ ИНСТИТУТ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРИРОДНЫМИ РЕСУРСАМИ НАЦИОНАЛЬНОГО  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ТАШКЕНТСКОГО ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРОВ  
ИРРИГАЦИИ И МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО  
ХОЗЯЙСТВА**

**Х. НУРИДДИНОВ,  
Ж.Ж.КУЧКАРОВ**

**РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК КОМБИНИРОВАННОЙ СУШИЛКИ.**

Бухара -2023

В монографии приведены расчёт и исследование теплотехнических характеристик комбинированной сушилки, необходимость рассмотрения двух вариантов расчета сушилки.

Первый вариант – расчёт параметров сушилки при сушке горячим воздухом и второй – расчёт параметров сушилки при одновременном воздействии горячего воздуха и солнечного излучения.

Для научных работников, аспирантов, преподавателей и магистров.

**УДК 632.096**

**Ответственный редактор:**

Кандидат технических наук                      З.Т.Тоиров

**Рецензенты:**

Кандидат технических наук                      М.Р.Назаров

Доктор педагогических наук                      Х.О.Жураев



## ВВЕДЕНИЕ

Целью эти работы рассмотрение балансовой системы уравнений описывающих тепло – и массообмен в сушилке и на этой основе, с учетом данных, полученных выше, разработки инженерной методики расчета параметров комбинированной сушильной установки.

Особенность задачи заключается в том ,что параметры сушилки зависят от продукта и режима его сушки. В связи с этим , одной из задач главы является исследование возможности обобщения результатов по сушке различных продуктов. Другая особенность методики расчета связана с конструкцией комбинированной гелио-сушилки, и заключается в том , что сушильная камера может иметь светопрозрачное ограждение , через которое на продукт может непосредственно попадать солнечное излучение ,т.е. может иметь место комбинированный нагрев продукта горячим воздухом илучи от гелионагревателя и солнечным излучением. В связи с этим, возникает необходимость рассмотрения двух вариантов расчета сушилки.

Первый вариант – расчет параметров сушилки при сушке горячим воздухом и второй – расчет параметров сушилки при одновременном воздействии горячего воздуха и солнечного излучения . В общем задачей расчета комбинированной гелиосушилки является выбор таких значений параметров, которые обеспечивали бы не только приемлемую производительность, но и экономичность процесса сушки. В связи с этим основная задача данной главы получение зависимостей и разработка методики расчета, которая позволяла бы в првом при приближении связать технические и массогабаритные параметры комбинированной гелиосушилки.

## I. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕЛИОСУШИЛКИ.

Настоящей работы является рассмотрение балансовой системы уравнений описывающих тепло и массообмен в сушилке и на этой основе, с учетом данных, полученных выше, разработки инженерной методики расчета параметров комбинированной сушильной установки.

Особенность задачи заключается в том, что параметры сушилки зависят от продукта и режима его сушки.

В общем задачей расчета комбинированной гелиосушилки является выбор таких значений параметров, которые обеспечивали бы не только приемлемую производительность, но и экономичность процесса сушки.

[1,2]

Перед нами стоял общей задачей расчета комбинированной гелиосушилки является выбор таких значений параметров, которые обеспечивали бы не только приемлемую производительность, но и экономичность процесса сушки.[3,4]

В связи с этим основная задача получение зависимостей и разработка методика расчета, которая позволяла бы в первом приближении связать технические и массогабаритные параметры комбинированной гелиосушилки.

Исходными уравнениями, на основе решения которых, определяются производительность сушилки и ее экономичность являются уравнения теплового и материального баланса. [5,6]

Методика построения такой балансовой системы уравнений достаточно подробно изложена в литературе. В общем случае уравнение теплового баланса для интервала времени можем записать в виде.

$$Q_H + Q_{вснт} = Q_{нп} + Q_{исп} + Q_K + Q_{пв} \quad (1)$$

где  $Q_H$  - тепло, затраченное на нагрев теплоносителя (воздуха), при входе его в камеру сушилки;  $Q_{вснт}$  - тепло, выделяемое вентилятором;  $Q_{нп}$  - тепло, идущее на нагрев продукта;  $Q_{исп}$  - тепло, идущее на испарение воды из продукта;  $Q_K$  - потери тепла стенками камеры в окружающую среду;  $Q_{пв}$  - потери тепла воздухом, выходящим из камеры.

Распишем составляющие, выходящие в (1). В общем случае

$$Q_H = (G_\beta * C_\beta (t_{вх} - t_0) + G_1 * C_1) * \Delta t \quad (2)$$

Где,  $G_\beta$ ,  $G_1$  - массовые расходы воздуха и пара в воздухе;

$G_{\beta}, \text{Ч}_1$  - теплоемкости воздуха и пара.

При нагреве воздуха электрокалорифером

$$Q_{\text{н}} = P_{\text{к}} * \Delta \tau \quad (3)$$

а при нагреве воздуха в гелионагревателе

$$Q_{\text{н}} = E_{\text{с}} * \eta_{\text{в}} * S_{\text{гн}} * \Delta \tau \quad (4)$$

Здесь  $E_{\text{с}}$ -плотность солнечного излучения;  $\eta_{\text{гн}}$ -к.п.д. и  $S_{\text{гн}}$ - площадь гелионагревателя.

Тепло  $Q_{\text{вент}}$ , выделяемое вентилятором включает две составляющие, первая, работа на перемещение воздуха  $Q_{\text{А}}$

и тепло  $Q_{\text{Т}}$  выделяемое вентилятором, или

$$Q_{\text{вент}} = Q_{\text{А}} + Q_{\text{Т}} = [\eta_{\text{гн}} * P_{\text{В}} + (1 - \eta_{\text{В}}) * P_{\text{В}}] * \Delta \tau \quad (5)$$

Распишем составляющее правой части (1). Ваше было показано, что тепло идущее на нагрев продукта  $Q_{\text{НП}}$  зависит от периода сушки и на первом и частично на втором этапе сушки, когда все продукту тепло идет на испарение воды может быть принято равным нулю. Тепло  $Q_{\text{исп}}$  на испарение воды из продукта определим в виде.

$$Q_{\text{исп}} = N_{\text{э}} * S_{\text{п}} * \text{Ч} * \Delta \tau \quad (6)$$

В установившемся режиме

$$Q_{\text{исп}} = Q_{\alpha} = \alpha * S_{\text{п}} * (t_{\text{в}} - t_{\text{п}}) \quad (7)$$

$$\text{и, } Q_{\text{исп}} = Q_{\text{Е}} + Q_{\alpha}^1 = E * S_{\text{п}} * \Delta \tau \pm \alpha' * S_{\text{п}} * (t'_{\text{в}} - t'_{\text{п}}) \quad (8)$$

при совместном подводе тепла излучением и конвекцией.

Тепловые потери  $Q_{\text{к}}$  стенками сушильной камеры запишем в виде:

$$Q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} * S_{\text{к}\Sigma} * (t_{\text{к}} - t_{\text{о}}) \quad (9)$$

где  $\alpha_{\text{к}}$ -коэффициент теплоотдачи от стенок в окружающую среду, имеющую температура  $t_{\text{о}}$ ;  $t_{\text{к}}$ -температура и  $S_{\text{к}\Sigma}$ - суммарная площадь теплоотдающих поверхностей стенок камеры.

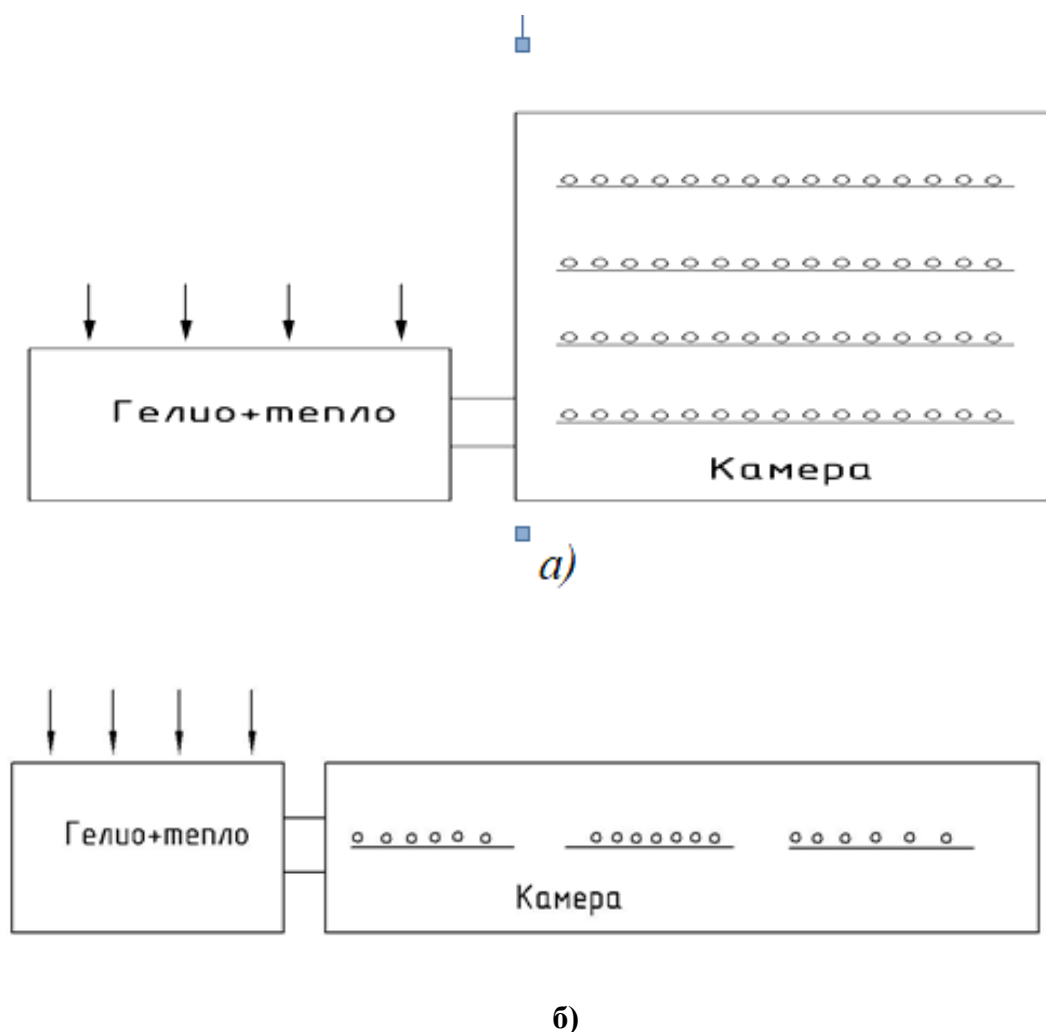
Потери тепла  $Q_{\text{ПК}}$ воздухом, выходящим из камеры определим в виде:

$$Q_{\text{ПК}} = (G * C_{\text{В}} * (t_{\text{вых}} - t_{\text{о}}) + G_2 * \text{Ч}_2) * \Delta \tau \quad (10)$$

Схема теплового баланса сушилки приведена на рис.1а. Для решения приведенной системы уравнений их надо дополнить зависимостями



описывающими температурно- влажностный режим в сушилке, а также зависимостью описывающей скорость сушки от температуры или плотности потока излучения по длине (высоте камеры см.рис.1б).



**Рис.1.** Схемы комбинированной сушилки; а)-вертикальная, б)-горизонтальная.

Исследования теплового баланса и температурного режима в камере сушилка показала, что при движением теплоносителя в камере, изменяются как температура- влажностный режим воздуха, так и температура и скорость сушки продукта, причем, скорости сушки практически пропорционально увеличению влажности воздуха.

На основе проведенных исследований получены упрощения при описании процесса сушки, которые позволяют более обоснованно проводить инженерные расчеты при проектировании сушилки, в частности, задавать входные и выходные влажности воздуха, определять длину ( или высоту) камеры сушки.

## II. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ ПРОДУКТОВ

В работе указанные особенности температурного режима в камере сушилки показало что при движении теплоносителя в камере, изменяются как температурно – влажностный режим воздуха, так и температура и скорость сушки продукта, причем, скорости сушки практически пропорционально увеличению влажности воздуха. На основе проведенных исследований получены упрощения при описании процесса сушки, которые позволяют более обоснованно проводить инженерные расчеты при проектировании сушилки, в частности задавать входные и выходные влажности воздуха, определять длину (или высоту) камеры сушки.

В работе приведена методика расчета скорости сушки и ее изменения по длине камеры. Однако в приведенном примере не учитывается изменение влагосодержания пара в воздухе и ее влияние на скорость сушки. Можно отметить, что в настоящее время при расчете тепловых параметров сушилки используется уравнение баланса формулы в котором задаются производительность (или усредненная скорость сушки) и параметры воздуха (температура и влажность) на входе и на выходе из сушилки. В результате расчета определяется массовый расход воздуха и тепло необходимое для сушки [1.2.3.4]. Для определения габаритных размеров сушилки должно быть известно время сушки продукта или скорость сушки и зависимость ее от времени. Причем скорость сушки является функцией и влагосодержания, которая также переменна по длине (высоте) камеры. В связи с этим для анализа вопроса рассмотрим задачу изменения скорости сушки продукта по длине (высоте) камеры (см. рис.1).

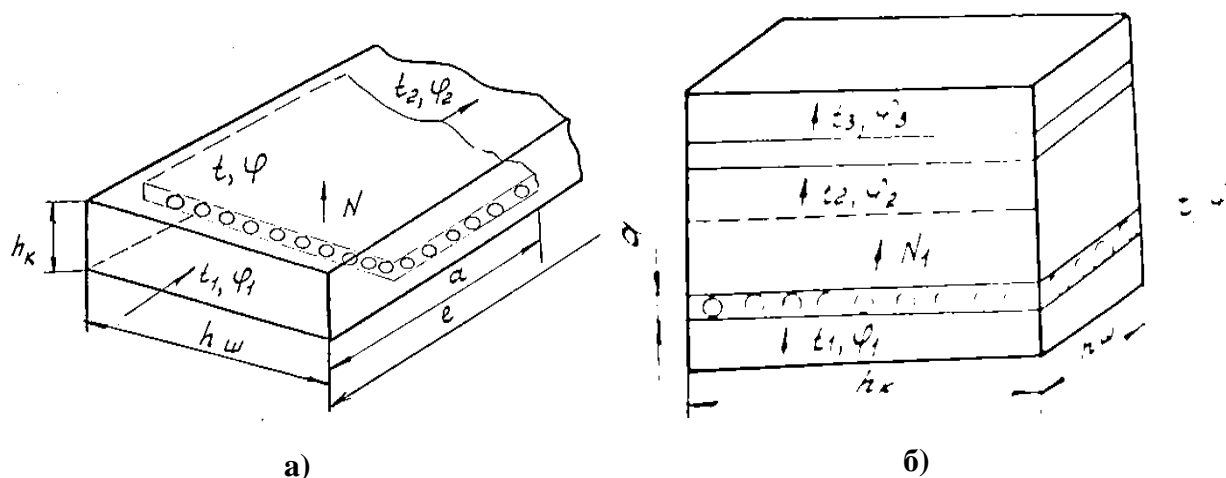


Рис.2 К определению скорости сушки в горизонтальной (а) и вертикальной (б) камерах сушки.

Рассмотрим вначале горизонтальную камеру [11.12.13.14]. Задачу будем решать при следующих условиях - камера длиной  $\ell$  разбивается на участки длиной  $a$  в пределах которых параметры воздуха и продукта постоянны. Даны также размеры камеры (см. рис.1а, б). Схема к определению температурно-влажностного режима сушилки на отдельных участках представлена на рис. 2.

На участке 0 даны температура  $t_0$  и влажность  $\varphi$  окружающего воздуха.

На участке I - нагреватель, даны температура  $t_1$ , и скорость движения воздуха  $\omega_1$ .

На основе этих данных определяем давление насыщения паров воды  $P_{H_1}$  при  $t = t_1$  по формуле [3]

$$P_H = \exp\left(\sum_{i=-1}^{i=1} a_i \left(\frac{t+273}{1000}\right)^i + Q_2 \cdot \ln(t + 273)\right) \quad (11)$$

Далее, учитывая, что парциальное давление пара на участке I равно парциальному давлению пара в окружающем воздухе  $P_{п1} = P_{п0}$

определяем влажность  $\varphi$  нагретого воздуха на участке I.

$$\varphi = \frac{P_{п1}}{P_{H1}} \quad (12)$$

и влагосодержание паров воды в воздухе  $d_1$

$$d_1 = 0.622 \frac{P_{п1}}{B - P_{п1}} \quad (13)$$

где  $B$  – барометрическое давление ( $B = 10332 \frac{kg}{m^2}$ ).

Находим количество тепла  $Q_1$ , переносимое воздухом перед входом на участок  $a$ .

$$Q_1 = G_1 \cdot C_p \cdot (t_1 - t_0) \cdot \Delta\tau \quad (14)$$

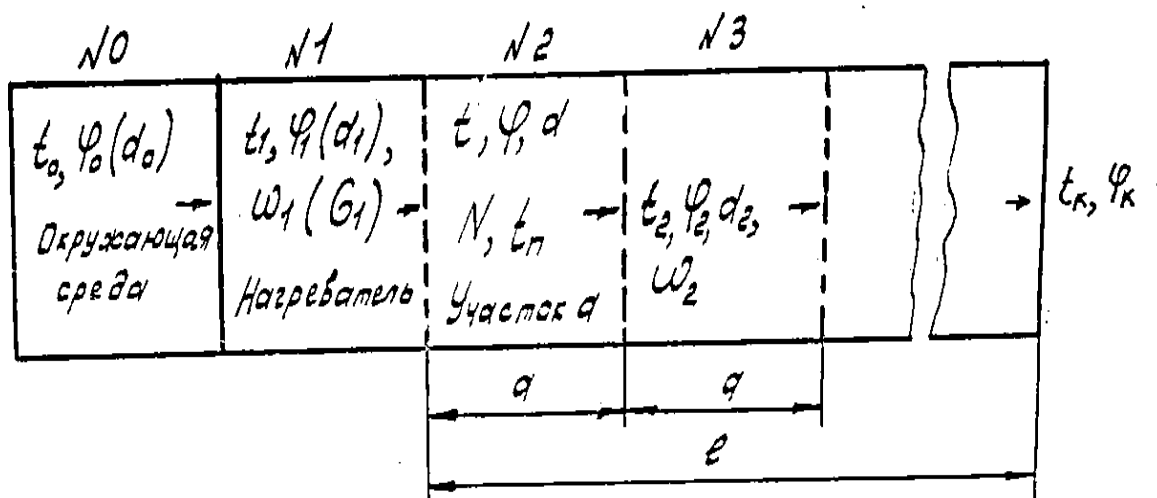


Рис. 3 Схема расчета температурно-влажностного режима, скорости сушки и тепловых потоков по длине горизонтальной камеры сушки.

где  $G_1$  - массовый расход и  $C_p$  - теплоемкость воздуха.

Время  $\Delta\tau$  определяется из скорости  $\omega_1$  и длины участка  $a$ .

$$\Delta\tau = \frac{a}{\omega_1} \quad (15)$$

Массовый расход воздуха равен

$$G = \omega_1 \cdot \rho \cdot h_k \cdot h_{ш} \quad (16)$$

Где  $\rho$  - плотность воздуха и  $h_k, h_{ш}$  - высота и ширина поперечного сечения камеры.

Переходим теперь к начальному участку сушилки  $a$ . Пусть нам здесь известна скорость сушки продукта  $N$ , тогда количество испаренной влаги  $m_n$  за время  $\Delta\tau$  равно

$$m_n = N \cdot S_n \cdot \Delta\tau \quad (17)$$

А количество тепла на испарение  $Q_{исп}$  равно

$$Q_{исп} = m_n \cdot r \quad (18)$$

С другой стороны оно должно быть равно количеству тепла, переданному воздухом продукту

$$Q_\alpha = \alpha \cdot S_n \cdot (t - t_n) \cdot \Delta\tau \quad (19)$$

где  $S_n$  - площадь поверхности продукта

$$S_n = a \cdot h_{ш} \quad (20)$$

Как известно, в стационарном режиме, особенно на первом и втором этапах сушки должно выполняться условие

$$Q_{исп} = Q_\alpha \quad (21)$$

Это условие позволяет связать тепло и массообменные процессы в сушилке. Однако это уравнение несовместно (две неизвестные). Поэтому, учитывая, что на первом и частично на втором этапе сушки температура продукта будет равна температуре мокрого термометра, задачу определения параметров на участке  $a$  будем решать следующим образом[15.16.17.18.19.21.22]. В первом приближении принимаем, что температура воздуха  $t_g$  на участке  $a$  равна температуре воздуха на входе  $t$ . Это в принципе определяется длиной участка -  $a$ , с уменьшением длины участка  $a$  это условие будет очевидно выполниться точнее. Тогда из формулы Шпрунга

$$P_n = P_{нп} - 6,78 \cdot (t - t_n) \frac{P}{10270} \quad (22)$$

С погрешностью, не превышающей 3-4 %, на основе итерационного решения можно определить температуру продукта  $t_n$ . Из (8) и формулы баланса следует, что если дано  $N$  начальное, то мы можем при заданном  $\alpha_k$  определить количество тепла  $Q_2$ , выносимое воздухом выходящим из участка  $a$  и его температуру  $t_2$ , или

$$Q_2 = Q_1 - Q_{исп} - Q_k \quad (23)$$

Где  $Q_k$  - потери тепла камерой в окружающую среду на участке.

$$Q_k = \alpha_k \cdot S_k \cdot (t - t_0) \cdot \Delta\tau \approx 2 \cdot \alpha_k \cdot S_n \cdot (t - t_0) \cdot \Delta\tau \quad (24)$$

Подставляя в значения  $Q_1, Q_{исп}, Q_k$  получим

$$Q_2 = \left( \omega_1 \cdot \rho_1 \cdot h_k \cdot h_{ш} \cdot C_p \cdot (t_1 - t_0) - r \cdot N \cdot a \cdot h_{ш} - 2\alpha_k \cdot a \cdot h_{ш} (t - t_0) \right) \Delta\tau \quad (25)$$

Учитывая, что массовый расход воздуха постоянен, т.е.  $G = G_1$  получим

$$t_2 = \frac{t_0 + Q_2}{G_1 \cdot C_p \cdot \Delta\tau}$$

или

$$t_2 = t_0 + \frac{(\omega_1 \cdot \rho_1 \cdot h_k \cdot C_p (t_1 - t_0) - N \cdot r \cdot a - 2 \cdot \alpha_k \cdot a \cdot (t_1 - t_0)) \cdot h_{ш}}{\omega_1 \cdot \rho_1 \cdot h_k \cdot h_{ш}} \quad (26)$$

Итак, мы определили температуру  $t_2$  воздуха на выходе из участки  $a$ . На выходе из участка  $a$  уже имеем и другую влажность воздуха  $\varphi$  и вследствие этого на участке 2 будет изменяться и скорость сушки  $N_2$ . В общем случае скорость сушки определяется как температурой сушильного агента, так и его влажностью. Зависимость скорости сушки от температуры для ряда продуктов была получена нами выше [20.23]. Косвенную зависимость скорости сушки от влажности и температуры воздуха можно определить из формулы Дальтона, справедливой для скорости испарения воды со свободной поверхности. С достаточным основанием эту формулу можно использовать на первом и втором этапах сушки, когда считается что поверхность продукта покрыта сплошной водяной пленкой. Формулу Дальтона запишем в виде :

$$N = C \cdot (H - h), \frac{r}{M^2 \cdot ч} \quad (27)$$

где  $C$  – коэффициент испарения, зависящий от скорости воздуха;

$H$  – давление насыщения паров у поверхности воды при температуре мокрого термометра (температура продукта) и  $h$  – парциальное давление пара в воздухе [4].

Используя формулу Шпрунга (12), (17) можно переписать в виде

$$N = C \cdot 6.78 \cdot (t - t_n) \frac{P}{10270} \quad (28)$$

Из (17), (18) четко видна зависимость скорости испарения  $N$  от температуры и влажности воздуха (входит в  $h$ ). Коэффициент  $C$  по данным [4] можно представить в виде :

$$C = (172.2 + 130.8 \cdot \omega) \cdot 10^{-3}, \frac{r}{M^2 \cdot ч \cdot \frac{кг}{м^3}} \quad (29)$$

Итак, для определения параметров сушки на втором участке нам необходимо также знать скорость теплоносителя  $\omega^2$  и парциальное давление пара в воздухе  $P_{п2}$ .

Учитывая, что  $G_1 = G_2$ , получим

$$\omega_2 = \omega_1 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (30)$$

Определим  $P_{п2}$ . При входе на участок 2 нам известно  $t_2$  и  $d_2$

$$d_2 = d_1 + \Delta d_1 \quad (31)$$

где

$$\Delta d_1 = \frac{m_{п}}{\rho_{в} \cdot V_{в}} \quad (32)$$

где  $V_{в}$  – объем воздуха на отдельном участке в которой испарилась влага  $m_{п}$  из продукта. ( $V_{в} = h_{к} \cdot h_{ш} \cdot a$ ), при значениях  $\omega_{в}^{M/C}$ ,

$$d_2 = d_1 + \frac{N_1 \cdot h_{ш} \cdot a \cdot \Delta \tau}{\omega_1 \cdot h_{ш} \cdot h_{к} \cdot \Delta \tau} = d_1 + \frac{N_1 \cdot a}{3600 \cdot h_{к} \cdot \omega_1} \left[ \frac{\text{г}}{\text{кг} \cdot \text{сух}} \right] \quad (33)$$

И из (3) определим  $P_{п2}$  и проводится расчет параметров на втором участке, далее процесс повторяется до выхода из камеры. Пример расчета изменения температурно-влажностного режима в горизонтальной камере, при следующих исходных данных :  
окружающий воздух :  $t_0 = 28^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 55\%$

воздухе, выходящего из нагревателя :  $\omega_1 = 1^{M/C}$ ;  $t_1 = 45^{\circ}$

параметры камеры :  $h_{к} = 0,1$  м,  $h_{ш} = 0,5$  м,  $a = 1$  м

параметрах продукта :  $N_1 = 0,1 \frac{\text{кг}}{(\text{м}^2 \cdot \text{ч})}$

приведены на рис. 3. Из рис. 3 а, б следует, что при данном соотношении параметров - потеря тепла воздухом на отдельных участках составляет около 10 % (не конвекцию и испарение) и имеет место достаточно сильное изменение скорости сушки и влажности продукта - практически уменьшение скорости сушки пропорционально увеличению влажности воздуха. В то же время можно отметить, что практически постоянными остаются влагосодержание воды в воздухе, давление насыщения пара у поверхности продукта и скорость движения воздуха в камере. Вследствие указанных особенностей практически постоянно и парциальное давление пара в воздухе.

Проведенные исследования позволяют определить длину рабочего участка камеры и задать пределы изменения температурно-влажностного режима в камере[5.6].

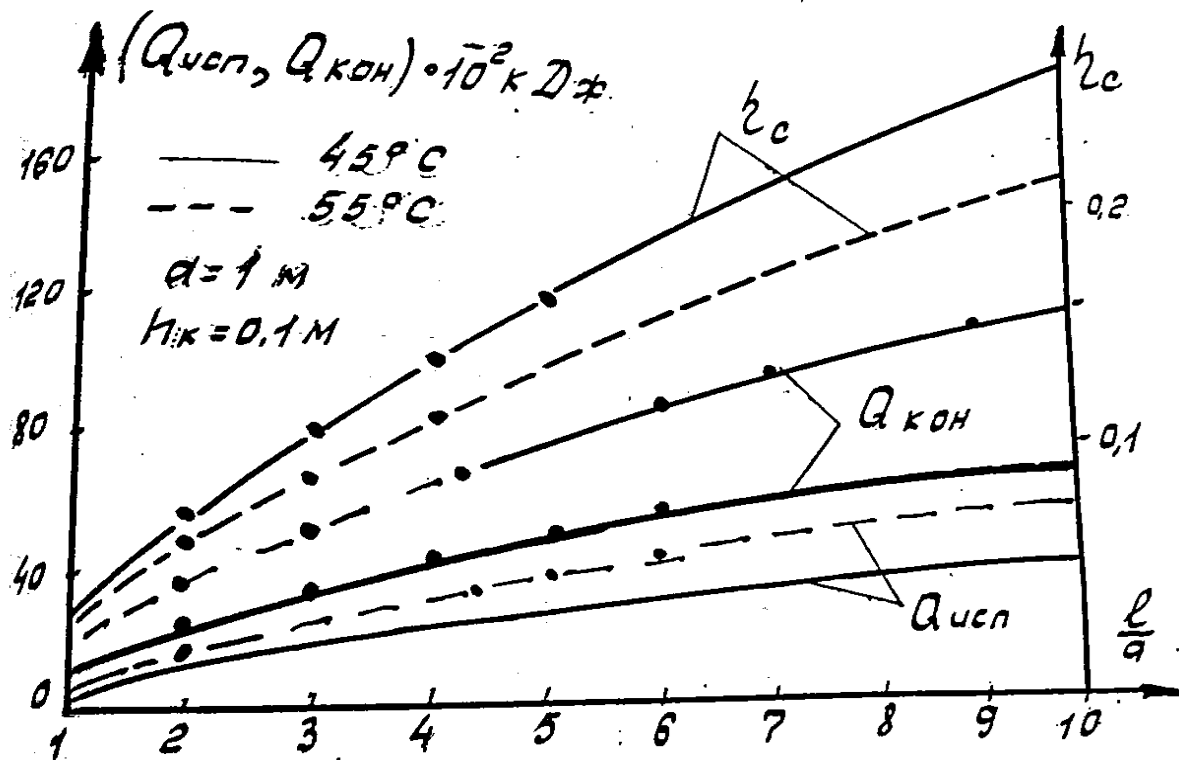
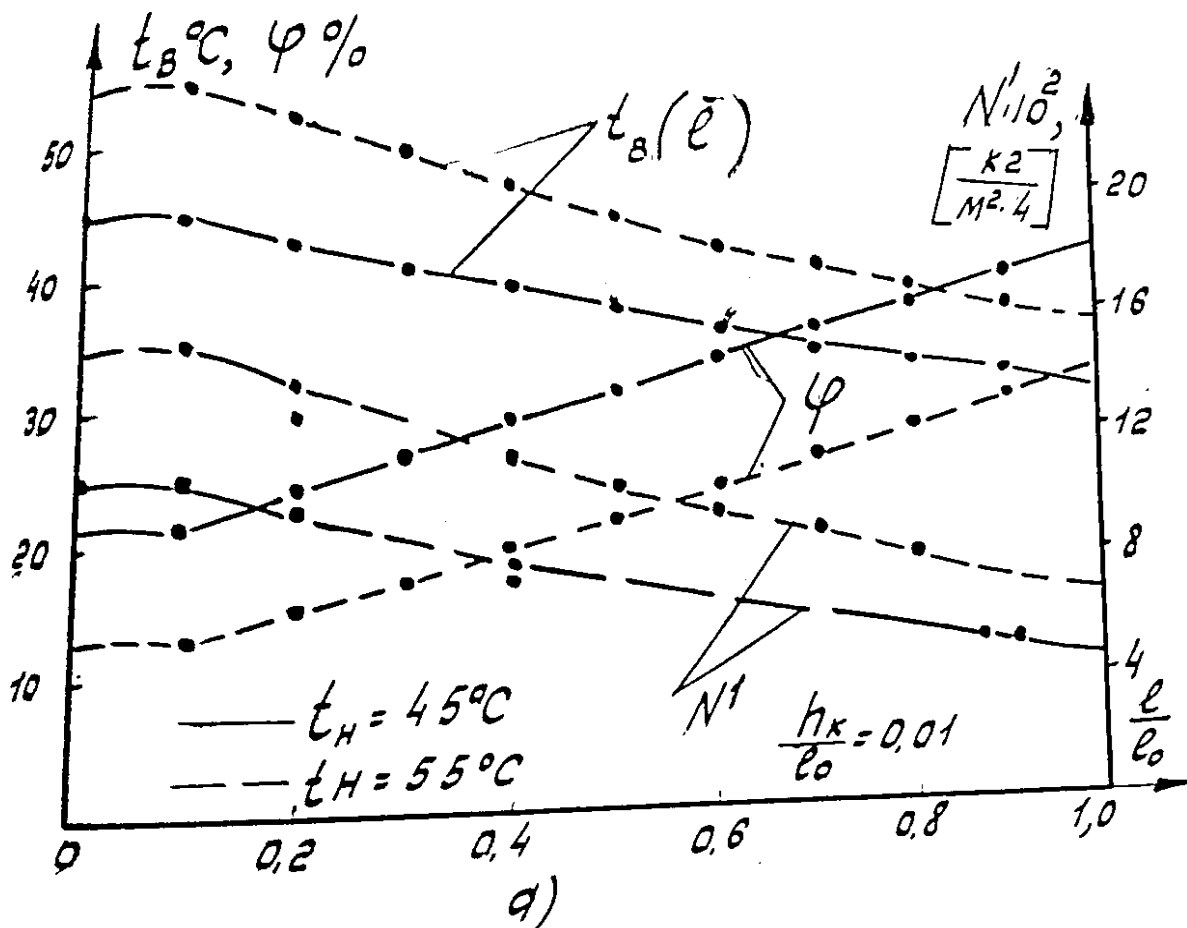


Рис. 4. Температурно-влажностный режим и распределение тепловых потоков по длине горизонтальной камеры сушки.

Результаты исследований сушки в горизонтальной камере можно перенести на вертикальную камеру при условии их одинаковых загрузок.

Из проведенного анализа также следует, что интенсивности теплообменных процессов в комбинированной сушилке при конвективной сушке при выбираемых режимах сушки не превысят  $200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  с учетом теплопотерь стенками камеры.

В связи с этим представляет практический интерес рассмотрения случая, когда верхняя стенка горизонтальной камеры прозрачна для солнечных лучей.

### III. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ СУШКЕ ПРОДУКТОВ

Рассмотрим тепловой режим и абсолютности радиационной сушки продуктов (сушка солнечным излучением) в комбинированной сушилке.

В работе [2] были проведены сравнительные исследования конвективной сушки влияния на сушку излучения.

Автор делает вывод о том, что влияние излучения незначительно.

Метод автора [2] основан на введении в уравнение баланса эффективной температуры, которая характеризует падающее излучение не связана с действительными температурами продукта и воздуха в камере.

Рассмотрим в начале особенности сушки при подводе тепла излучением. При установившемся режиме сушки подводимый тепловой поток равен теплу, идущему на испарение, или

$$S_n * E = N * r * s \quad (34)$$

Отсюда следует, что скорость сушки  $N$  равна

$$N = \frac{E}{r} \quad (35)$$

С другой стороны для скорости испарения воды со свободной поверхности известна формула Дальтона

$$N = C * (P_n - P_p) \quad (36)$$

здесь  $P_n$  и  $P_p$  в  $\text{кг}/\text{м}^2$ , которую с учетом формулы Шпрунга можно записать в виде :

$$N = C * 6.78 * (t_b - t_p) \quad (37)$$

Из анализа (2) - (4) можно сделать следующие предположения выводы.

При конвективной сушке- (4) скорость сушки  $N$  как это и известно пропорциональна разности температур и с увеличением температуры воздуха  $t_b$  она



растет. При радиационной сушке, когда температура воздуха может незначительно отличаться от температуры продукта, необходимую скорость сушки, как видно из (3) можно обеспечить только за счет увеличения разности давления насыщения  $P_n$  у поверхности воды (при температуре продукта  $t_n$ ) и парциального давления пара в воздухе  $P_p$  ( $P_p$  - в общем случае зависит как от температуры, так и от влажности воздуха, тогда как  $P_n$  функция только температуры)?

Увеличить давление насыщения  $P_n$  можно только за счет увеличения температуры продукта.

Отсюда следует принципиальная разница между конвективной и радиационной сушкой. Если в первом случае необходимо для увеличения скорости сушки необходимо повышать температуру теплоносителя, то во-втором случае при подводе тепла излучением необходимую скорость сушки можно обеспечить только за счет повышения температуры продукта. Таким образом при сушке излучением температуры

продукта могут существенно превышать температуры продукта имеющие место при конвективной сушке.

Характерные температуры продукта при сушке излучением, полученные на основе уравнений (1)-(4) приведены на рис.1, там же дана скорость сушки.

Из рис. 1 видно, что температура продукта действительно растет, но значительно меньше, чем плотность падающего потока излучения  $E$ , скорость же сушки пропорциональна падающему потоку. Эти обстоятельства важны для практики сушки, т.к. увеличение температуры продукта выше некоторого предела недопустимо. Эти результаты, полученные для модели сушки в виде испарения воды со свободной поверхности справедливы для конкретных продуктов только до некоторого предела, которые обусловлены внутренними процессами переноса влаги в продукте. Эти границы необходимо устанавливать для каждого продукта на основе экспериментальных исследований. Для практики также важны случаи о назначении величин температуры и влажности воздуха в сушилке при сушке излучением и их влиянии на температуру продукта и скорость сушки.

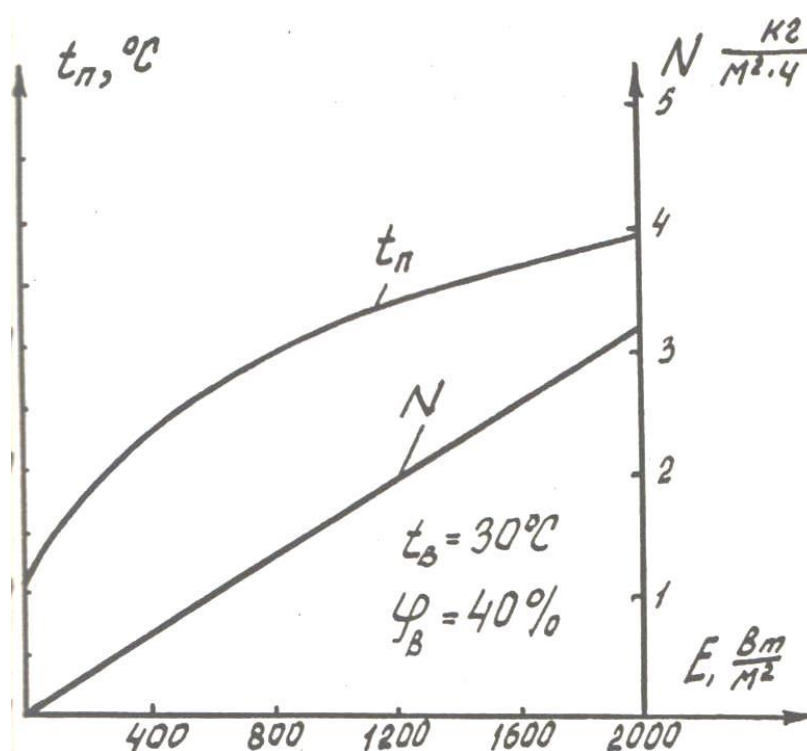
Выше был рассмотрен температурно-влажностный режим в камере сушки при конвективном подводе тепла. Было показано, что уменьшение скорости практически пропорционально увеличению влажности в продукте. Эти процессы были обусловлены увеличением парциального давления пара в воздухе  $P_p$  и уменьшением давления

насыщения у поверхности продукта. Причем, уменьшение  $P_n$  и увеличение  $P_p$  находилось в пределах 12%, а при этом изменение  $N$  и  $\varphi$  составило около 50 %.

Рассмотрим эти зависимости при сушке излучением. Пусть температура воздуха, входящего в сушилку составляет  $t_n$ , влажность  $\varphi_n$ , тогда парциальное давление воздуха равно :

$$P_n = \varphi_n * P_{нв} \quad (38)$$

где  $P_{нв}$ , давление насыщения паров в воздухе при  $t_n$ .



**Рис. 5** Температура и скорость сушки продукта в зависимости от плотности поглощенного продуктом излучения

$P_{нв}$  можно определить либо из таблиц или из формулы. Влажность воздуха  $d$  равно

$$d = 0.622 * \frac{P_n}{B - P_n} \quad (38)$$

Из определения  $d$  следует, что т.к. с изменением температуры влажность не изменяется, то как видно из (6) постоянным остается и парциальное давление пара в воздухе (при этом влажность воздуха уменьшается, а давление насыщения увеличивается), растет и потенциал сушки  $\Delta dp$  равный

$$\Delta d_{\Pi} = d_{\Pi} - d = 0,622 * P_{\Pi} * \left( \frac{1}{\frac{B}{P_{\Pi}} - 1} - \frac{\varphi}{\frac{B}{P_{\Pi}} - 1} \right) \quad (39)$$

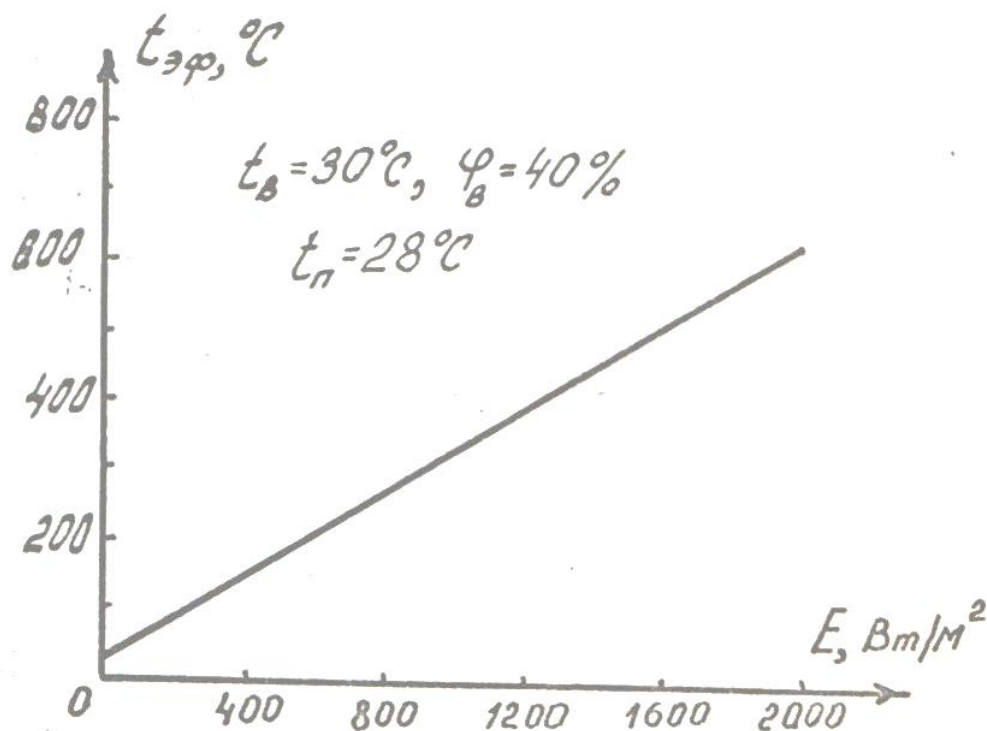
Из формулы Дальтона (см. 3) следует, что при данной температуре продукта с изменением температуры воздуха скорость сушки изменяться не будет. Однако в зависимости от того, будет ли температура воздуха меньше или больше температуры продукта, будет изменяться тепловой баланс между излучением и продуктом. Часть тепла продукта будет отдаваться воздуху конвекцией или забираться воздухом.

Для описания такого совместного процесса, необходимо либо перевести температуру воздуха в тепловой поток излучением, либо наоборот, как в [2] перевести поток излучения в температуру (эффективная температура). Из системы уравнений (2)-(4) следует, что связь между эффективной температурой и изменением  $E$  имеет вид :

$$t_{эф} = t_{\Pi} + \frac{E}{6.78 * r * C} \quad (40)$$

На рис. 2 приведена зависимость от  $E$ .

Из этой системы уравнений также следует формальная зависимость связывающая плотность потока излучения с разностью температур  $t_{\text{в}} - t_{\Pi}$  и плотностью потока излучения  $E$ .



**Рис.6** Эффективные температуры излучения потока плотностью  $E$  .

$$t_{\text{в}} - t_{\text{п}} = \frac{E}{6,78 * C * r} \quad (41)$$

Анализ процесса также показывает, что если при конвективной сушке скорость сушки по длине камеры уменьшается, то при сушке излучением скорость сушки может оставаться постоянной. Это будет обусловлено тем, что увеличение парциального давления пара в воздухе  $P_{\text{п}}$  будет компенсироваться увеличением температуры продукта. Т.е. имеет место процесс в какой то степени саморегуляции скорости сушки. На рис. 3 качественно такой случай, когда влажность воздуха повышается, а температура воздуха  $t_{\text{в}}$  и плотность падающего потока  $E$  постоянны. Схема расчета имела вид : для заданного  $\varphi$  и  $t_{\text{в}}$  определили  $P_{\text{п}}$ , далее из уравнения

$$P_{\text{п}} = \left( \frac{E}{(C * r)} + P_{\text{п}} \right) \quad (42)$$

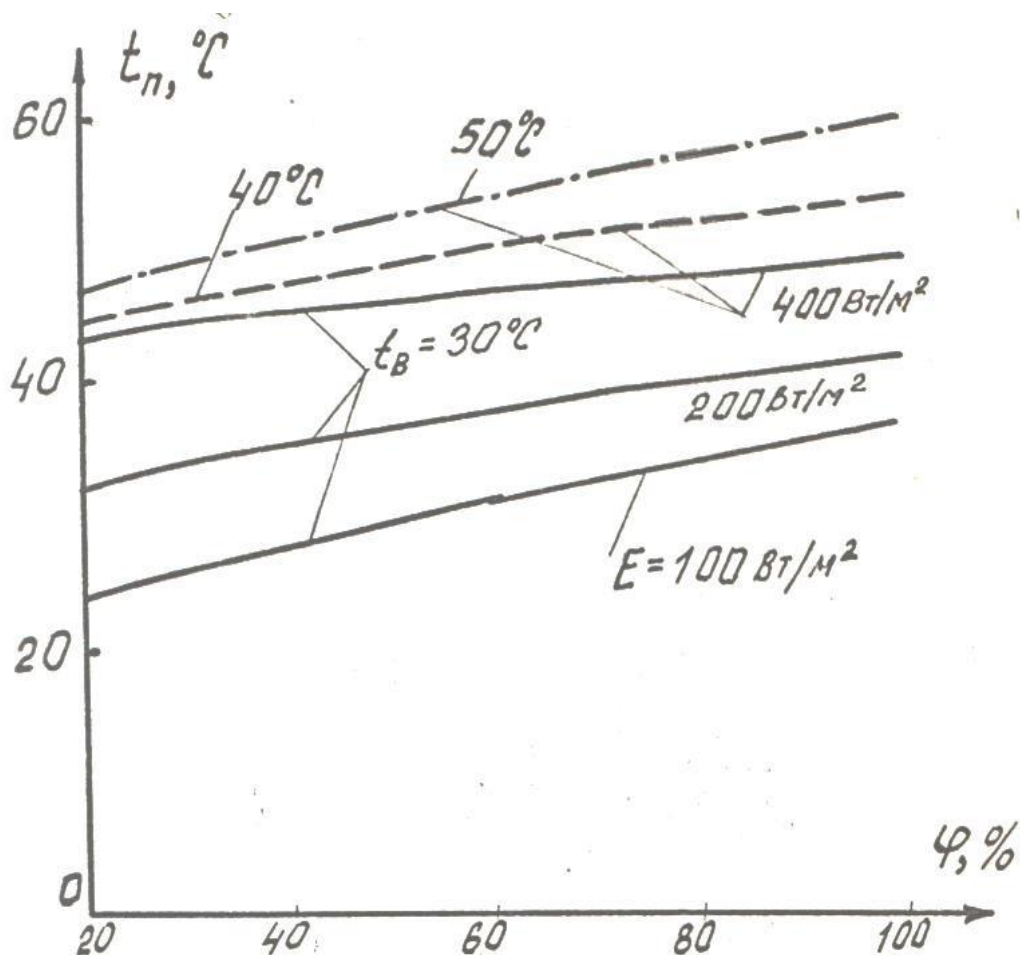
определяем  $P_{\text{п}}$ , и из таблиц водяного пара определяем температуру продукта  $t_{\text{п}}$ .

Из результатов исследования этого вопроса следует, что действительно с ростом влажности воздуха в камере сохранение теплового баланса или постоянства скорости сушки приводит к повышению температуры продукта (и наоборот). Однако, как видно из рис. 2 темп роста температуры существенно ниже темпа роста влажности.

Так рост влажности в 3 раза, с 20 % до 60 % приводит к росту порядка 30-40%, и только на 50 % при изменении влажности воздуха с 20 % до 100 %.

Таким образом, при сушке излучением фактор влажности практически не влияет на скорость сушки. Это имеет практическое значение т.к. в комбинированной сушилке это позволяет снять ряд ограничений, которые имеют место в конвективных сушилках - ограничение на максимальную влажность воздуха в камере, а отсюда на расходы воздуха или длину камеры.

Так же из рис. 1, 3 можно видеть, что несмотря на имеющее место повышение температуры продукта, эти температуры в общем не превышают температур, при которых начинаются качественные изменения в продукте.



**Рис. 7** Температура нагрева продукта при сушке излучением в зависимости от влажности воздуха в камере при различных плотностях излучения и температуры воздуха в камере  $t_B$ .

В целом из проведенных исследований следует, что радиационная сушка достаточно эффективна и этот способ подвода тепла к продукту необходимо учитывать при разработке комбинированной сушилки, можно также отметить, что полученные результаты позволяют определять необходимый уровень плотности излучения в области линейного изменения скорости сушки.

#### IV. РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕЛИОТЕПЛОВОЙ СУШИЛКИ

Методика расчета нагревателей, включающих и расчет вентилятора, для обычных тепловых сушилок достаточно подробно разработана и изложена в литературе (2, 3, 4). Здесь мы рассмотрим особенности, связанные с работой нагревателя в составе комбинированной сушилки. Первая особенность, исследование возможности использования естественной конвекции и второй, совмещение гелио и теплового нагревателя. При естественной конвекции, источниками энергии для обеспечения движения воздуха являются архимедовы силы, которые обусловлены двумя составляющими, первая за счет нагрева воздуха и вторая, за счет пара, испаряющегося из продукта. Рассмотрим эти составляющие. При нагреве воздуха избыточное давление  $\Delta P$  в первом приближении равно :

$$\Delta P = hg \cdot (\rho_1 - \rho_2) \quad (43)$$

где  $h$  – высота ГВ,  $\rho_1, \rho_2$  – плотность воздуха при температурах  $t_1$  и  $t_2$  ( $t_1$  – температура воздуха в объеме ГВ и  $t_2$  – температура воздуха на поверхности приемника).

Оценка (1) при  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 45^\circ\text{C}$  показывает, что

$$\Delta P \cong 0.5 \cdot h, \text{ [Па]} \quad (44)$$

Из (2) видно, что в реальных ГВ, при  $h < 3\text{м}$  значение  $\Delta P$  не превысит 1,5-2 Па. Выше было получено, что потери давления в вертикальной камере составляют 10-20 Па, т.е. практически естественная конвекция за счет разности температур воздуха не будет иметь места. Рассмотрим теперь второй источник конвекции – разность плотностей пара и воздуха. При обычных условиях сушки влагосодержание пара в воздухе не превышает 1-3% от массы воздуха, т.е. можно отметить, что движение пара не сказывается на состоянии воздуха. Учитывая указанное, примем, что избыточное давление, создаваемое паром, пропорционально разности парциальных давлений пара на поверхности продукта  $P_{\text{нп}}$  и в воздухе  $P_{\text{пв}}$  и влагосодержанию пара в воздухе, или

$$\Delta P = d \cdot (P_{\text{нп}} - P_{\text{пв}}) \quad (45)$$

Значение  $d$  составляет  $\sim 0,01-0,03$ , а  $P_{\text{пв}}$  3000-3500 Па.,

$P_{\text{нп}}$  2300-2100 Па, или

$$\Delta P = 7 - 15 \text{ Па} \quad (46)$$

Эта величина как видим сравнима и может превышать потери давления в вертикальной камере.

Из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что для горизонтальных камер, когда продукт уложен в один ряд к потери давления малы может применяться схема с естественной вентиляцией воздуха, в случае вертикальных камер необходима принудительная вентиляция воздуха.

Рассмотрим теперь схему расчета гелио и теплового воздухонагревателя.

Расчет гелиовоздухонагревателя. Исходными данными на расчет являются количество тепла для испарения необходимого количества количества воды из продукта и к.п.д. процесса сушки в камере.

Выше были проведены исследования тепловых процессов в сушилке, определено количество тепла, идущее на испарение. Из расчета процесса было получено, что эффективность использования тепла воздуха, поступающего из нагревателя, или к.п.д. сушки  $\eta_c$  составляет около 15-30 %. Отсюда следует, что если нам задана производительность сушилки, например, по сырому продукту  $P_c \left( \frac{\text{кг}}{\text{час}} \right)$  и влажности продукта: начальная  $\omega_n$  и конечная  $\omega_k$ , то количество тепла и  $Q_{ГВ}$ , которое должно поступать от гелиовоздухонагревателя (ГВ) будет равно

$$Q_{ГВ} = \frac{\Delta\tau \cdot r \cdot (P_c - P_k)}{\eta_c} \quad (47)$$

$r$  – теплота парообразования воды ( $r \approx 2253$  кДж/кг или  $r = 630$  Вт/ч),  $\Delta\tau$  – время, час;  
 $P_k$  – производительность сушилки по конечному продукту.

Из определения влажности следует, что

$$P_k = P_c \cdot \frac{1 - \omega_n}{1 - \omega_k} \quad (48)$$

С другой стороны количество тепла, вырабатываемое ГВ, от падающего солнечного излучения плотностью  $E_c$  равно :

$$Q_c = \Delta\tau \cdot \eta_{ГВ} \cdot E_c \cdot S_{ГВ} \quad (49)$$

где  $\eta_{ГВ}$  – коэффициент эффективности ГВ, учитывающий пропускание прозрачной изоляции и потери тепла ГВ.

Из анализа (3,4), в которой подробно изложены вопросы определения эффективности гелиовоздухонагревателей следует, что эффективность ГВ  $\eta_{ГВ}$  изменяется от 0,85 до 0,3-0,5 при температурах нагрева воздуха в ГВ от 0°С до 60°-50°С,

Приравнивая (4) и (5) получаем выражение для определения основного параметра гелиовоздухонагревателя - площади поверхности ГВ -  $S_{ГВ}$ , или

$$S_{ГВ} = \frac{r \cdot (\Pi_c - \Pi_k)}{\eta_c \cdot \eta_{ГВ} \cdot E_c} \quad (50)$$

В тех случаях, когда нам дано  $\omega_H, \omega_K$  выражение (7) можно записать в виде

$$S_{ГВ} = \frac{r \cdot \Pi_c \cdot (\omega_H - \omega_K)}{\eta_c \cdot \eta_{ГВ} \cdot E_c \cdot (1 - \omega_K)} \quad (51)$$

Ориентировочные значения площади поверхности гелиовоздухонагревателя, в зависимости от производительности сушилки, для характерных значений  $\eta_c, \eta_{ГВ}, E_c$  приведены на рис. 1.

Рассмотрим теперь кратко схему расчета теплового воздухонагревателя (ТВ).

Тепловой воздухонагреватель (ТВ) отличается от ГВ очевидно только тем, что тепло  $Q_c$  вырабатывается за счет сжигания топлива или от электронагревателя. Рассмотрим случай определения мощности электронагревателя. Пусть  $P_3$  мощность и  $\eta_3$  к.п.д. электронагревателя. Известно (5), что к.п.д.  $\eta_3$  составляет порядка 0,8-0,9. Учитывая, что в данном случае

$$Q_c = P_3 \cdot \eta_3 \cdot \Delta t \quad (52)$$

а  $Q_{ГВ}$  имеет тот же вид, что и в (4), и приравняв к получим

$$P_3 = \frac{r \cdot (\Pi_c - \Pi_k)}{\eta_3 \cdot \eta_c} \quad (53)$$

Из сравнения (7) и (10) следует, что отношение мощностей ГВ и ТВ при обеспечении заданной производительности  $\Pi_c$  выражается в виде

$$\frac{P_3}{S_{ГВ} \cdot E} = \frac{\eta_{ГВ}}{\eta_3} \quad (54)$$

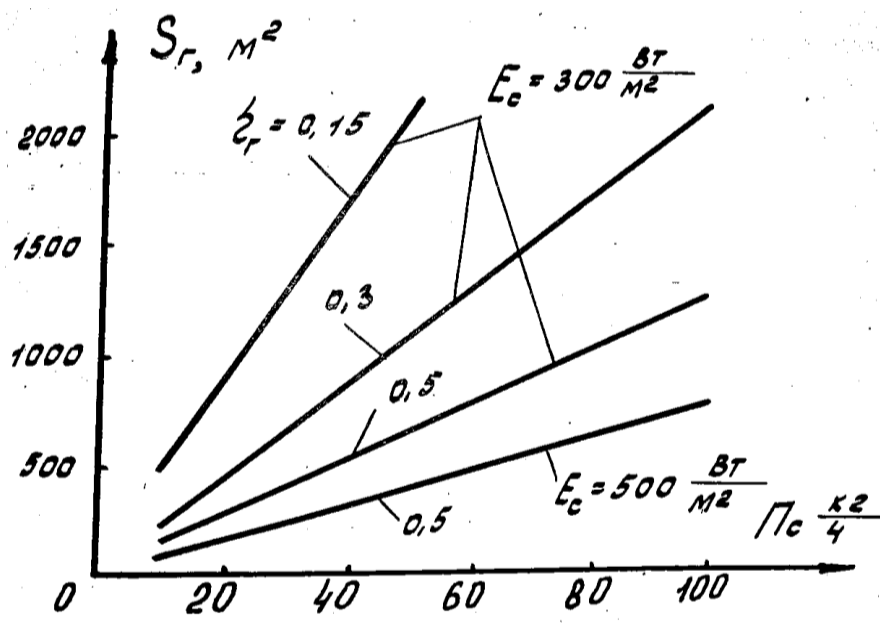


Рис. 8 Площадь гелионагревателя в зависимости от производительности сушилки  $\Pi_c$  для  $\omega_H = 85\%, \omega_K = 20\%$  и  $\alpha_3 = 5 \frac{BT}{M^2}, \eta_c = 0,25$ .



Полученные результаты позволяют проводить расчет гелио тепловых нагревателей комбинированной сушильной установки.

## V. ВЫВОДЫ

Проделанной работы можно сделать следующие выводы:

По результатам исследований проведенных с этим аботе можно сделать следующие выводы и предложения: Исследования теплового баланса и температурного режима в камере сушки показало, что при движении теплоносителя в камере, изменяются как температурно – влажностный режим воздуха , так и температура и скорость сушки продукта, причем, скорости сушки практически пропорционально увеличению влажности воздуха. На основе проведенных исследований получены упрощения при описании процесса сушки, которые позволяют более обоснованно проводить инженерные расчеты при проектировании сушки, в частности, задавать входные и выходные влажности воздуха, определять длину (или высоту) камеры сушки.

В данной работе также впервые, теоретически, на основе упрощенной модели, рассмотрены особенности температурного режима при сушке излучением. Показано, что вследствие того, что на практике, потоки излучения значительно превышают конвективные потоки тепла внешний механизм сушки изменяется. Из анализа этого вопроса следует, что при сушке излучением имеем также особенности-скорость сушки практически не будет зависеть от температуры и влажности воздуха в камере. Это обусловлено тем , что возникает процесс компенсации внешних условий за счет иаменения температуры продукта. При сушке излучением температура нагрева продукта будет существенно на 10-400С превышать температуру продукта, имеющие место при конвективной сушке.

Проанализированы особенности работы гелио и теплового воздухо-нагревателя в комбинированной сушилке.

Показано, что в ряде случаев отвод пара может осуществляться за счет естественной конвекции.

Получены инженерные формулы для расчета параметров гелио и теплового воздушнонагревателей в зависимости от заданной производительности сушки.



## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ЛИТЕРАТУРЕ.

1. Нуриддинов Х. «Разработка и исследование комбинированной гелиосушки плодово-овощной продукции» Дисс.к.т.н., Ташкент 1994.
2. О. Кришер Научные основы техники сушки, под.ред. д.т.н., проф. А.С.Гинзбурга, Ил. М., 1961.
3. Теплотехника и теплоэнергетика, кн.2, Справочник, М., «Энергоавтомиздат», 1988 г.
4. Нуриддинов Х., Кучкаров Ж.Ж., Жураев А.А., Нормаматов Ч.К., Нуриддинов О.Х. «Тепловой баланс комбинированной гелиосушки» «Школа Науки», №4 (15) 2019 г.
5. Нуриддинов Х., Кучкаров Ж.Ж., Нормаматов Ч.К., Жураев А.А., Нуриддинов О.Х. «Тепловой режим при радиационной сушке продуктов» «Школа Науки», №4(15) 2019 г.
6. Саламатов Ю.П. Идеализация технических систем [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.trizminsk.org/e/21102100.htm> (дата обращения: 22.05.2013).
7. Хикматов Д.Н. Совершенствование процесса комбинированной сушки абрикоса: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Ташкент, 2011. – 118 с.
8. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
9. Энергоресурсосберегающие технологии при переработке плодов и овощей / А.Ф. Сафаров, К.Х. Гафуров, Д.Н. Хикматов, А.А. Холиков. – Бухара: Дурдона, 2013.
10. . Mysak S.V. Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva sukhikh ryborastitel'nykh produktov. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Perfection of production technology fish with vegetables dry products. Cand. tech. sci. autoabstract diss.]. Krasnodar, 2007.
11. Karpenko V.YU. Razrabotka tekhnologii kontsentratov supov bystrogo prigotovleniya funktsional'-nogo naznacheniya iz plodovogo i ovoshhnogo syr'ya. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of technology of concentrates instant soups functional purposes of a fruit and vegetable raw. Cand. tech. sci. autoabstract diss.]. Krasnodar, 2011.
12. Bocharov V.A. Sovershenstvovanie ehlementov tekhnologii sushki ovoshhej. Avtoref. diss. kand. biol. nauk [Perfection of of elements of technology drying of vegetables. Cand. biol. sci. autoabstract diss.]. Michurinsk, 2010.
13. Maksyuta I.V. Razrabotka tekhnologii sukhikh ryborastitel'nykh produktov gerodieticheskogo naznacheniya. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of technology for fish

<https://novateurpublication.org/index.php/np>

with vegetables dry products gerodieticheskogo destination. Cand. tech. sci. autoabstract diss.]. Krasnodar, 2004.

14. Захидов Р.А., Киргизбаев Д.А., Нуриддинов Х.,, Результаты испытаний солнечной сушильной установки” .Гелиотехника, 1990 №2.
15. Aghbashlo M. et al. Measurement techniques to monitor and control fluidization quality in fluidized bed dryers: A review. *Drying Technology*. 2014.
16. Захидовч Р.А., Киргизбаев Д.А., Орлова Н.И., Нуриддинов Х.Н. «Комбинированная сушильная установка» Гелиотехника 1988, №4 с.60-64.
17. Захидовч Р.А., Киргизбаев Д.А., Нуриддинов Х.Н. «Мева ва узум куритишда кушма куёш куритгичидан фойдаланиш.» ”Янги техника” 1990.№ 6. 6-76.
18. Авезов З.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системь, отопления горячего водоснабжения. Т. ФАН, 1988 – с. 288.
19. [htt://sushilki.ru info29/html](http://sushilki.ru/info29/html)
20. [www/google.ru](http://www.google.ru)
21. [www/lambler.ru](http://www/lambler.ru)
22. [www/ziyonet.uz](http://www/ziyonet.uz)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	<b>ВВЕДЕНИЕ</b>
	<b>РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБИНИРОВАННОЙ СУШИЛКИ</b>
1.	<b>ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕЛИОСУШИЛКИ</b>
2.	<b>ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ ПРОДУКТОВ</b>
3.	<b>ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ СУШКЕ ПРОДУКТОВ</b>
4.	<b>РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕЛИОТЕПЛОВОЙ СУШИЛКИ</b>
5.	<b>Выводы</b>
	Используемые литературе

*Бухарский институт управления природными ресурсами национального  
исследовательского университета Ташкентского института инженеров  
ирригации и механизации сельского хозяйства*

**Редактор**

**З.Тоиров**

**Корректор**

**М.Назаров**

**Технический редактор**

**Х.Жўраев**

Подписано к печати 20.02. 2023. Формат 60x84 1/16

Офсетным способом. 3.5 усл- печ. л.

Тираж 100 экз