

ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ВОЗДУШНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ВНУТРИ ТЕПЛИЦЫ

КҮНӨСКАНАНЫН ИЧИНДЕГИ АБА ЖАНА ЖЫЛУУЛУК АГЫМДАРЫНЫН МОДЕЛДЕРИН ТҮЗҮҮ ЖАНА АЛАРДЫН ФИЗИКАЛЫК АНАЛИЗИ

PHYSICAL ANALYSIS AND MODEL BUILDING OF AIR AND HEAT FLOW INSIDE THE GREENHOUSE

Аннотация: В статье рассмотрена физическая модель, которая описывает процессы воздухообмена внутри зон децентрализующего микроклимата, то есть в рабочем объеме мини-теплицы. Выполнен анализ существующих систем обеспечения микроклимата, а также распределения температуры внутри теплицы при разных системах обогрева.

Аннотация: Макалада микроклиматты децентрализациялоочу зоналар б.а. кичи күнөскананын жумушчу көлөмдөгү аба алмашуу процесстерин сүрөттөчү физикалык модель каралган. Микроклиматты камсыздоонун азыркы системалары, ошондой эле күнөскана ичиндеги температуранын түрдүү жылытуу системаларында бөлүштүрүлүшү анализденген.

Abstract: The article considers a physical model that describes the processes of air exchange within the zones of the decentralizing microclimate, that is, in the working volume of the mine-greenhouse. The analysis of the existing microclimate support systems, as well as the temperature distribution inside the greenhouse with different heating systems, was performed.

Ключевые слова: физические модели, воздухообмен, параметры микроклимата, системы децентрализующего обеспечения, кинематическая характеристика.

Түйүндүү сөздөр: физикалык моделдер, аба алмашуу, микроклиматтын параметрлери, децентрализацияны камсыздоо системалары, кинематикалык мүнөздөмө.

Key words: physical models, heat and mass transfer, air exchange, microclimate parameters, decentralized support systems, jet kinematic characteristics.

Среди важнейших проблем современного мирового агропромышленного комплекса, том числе и на территории Кыргызстана, ключевое место занимают технологии тепличного хозяйствования, что при постоянном росте потребности на их продукцию определяет высокие приоритеты научных исследований в этой области.

Постоянное увеличение тарифов на энергопотребление требует создания более совершенных методов и подходов к разработке тепличных конструкций, позволяющих на фоне экономии тепло-энергозатрат и удельных расходов материалов повышать урожайность и качество выращенной продукции, создавать условия для применения новых прогрессивных агротехнологий.

Важно отметить, что теплицы с искусственным микроклиматом являются очень энергорасходными сооружениями: так, в зависимости от вида и способа отопления удельные тепловые расходы могут складывать 300 - 700 Вт/м². Эти расходы в значительной степени обусловлены тем, что во всем объеме теплицы поддерживаются высокие температура и влажность воздуха. Инженерные системы должны обеспечивать необходимые для развития растений параметры микроклимата непосредственно в зонах роста, а за их пределами - минимально допустимые. За счет этого можно достичь снижения удельных энергозатрат в 2,5...3 раза.

Кроме того, децентрализация зон роста позволяет повысить урожайность за счет сокращения срока вызревания и создания условий для исключения распространения и развития заболеваний растений по всей теплице.

Выполненные ранее научные исследования [1-2] не учитывали многофакторность исследуемых процессов и потому не дают возможность надежно и в полном объеме

обосновать конструктивные и технологические решения для систем обеспечения микроклимата в зонах вегетации растений.

Таким образом, исследования, направленные на обоснование и реализацию подходов к созданию в рассадных отделениях теплиц систем и оборудования для децентрализованного обеспечения микроклимата, являются важными и имеют актуальность.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие методы выращивания рассады и системы обеспечения необходимых параметров микроклимата рассадных отделений теплиц и их энергетические характеристики;

- построить физическую модель распространения воздушных потоков и провести аналитические исследования процессов воздухообмена и тепломассообмена внутри рабочего объема мини-теплицы с децентрализуемым обеспечением микроклимата и в пространстве между мини-теплицами;

Объект исследования - система децентрализованного обеспечения микроклимата рассадных отделений теплиц.

Предмет исследования - процессы и параметры воздухо- и тепломассообмена в системах децентрализованного обеспечения микроклимата рассадных отделений теплиц.

Методы исследования - физическое моделирование процессов воздухо- и тепломассообмена с проведением аналитических исследований.

Основные физические положения исследуемых процессов.

Физическая модель, которая описывает процессы воздухообмена внутри зон децентрализованного микроклимата, то есть в рабочем объеме мини-теплицы, базируется на таких принципах: приточный воздух подается вдоль длинных сторон мини-теплицы в виде струй один навстречу другому. Сначала струи поступают на нижнюю поверхность теплицы и после встречи объединенным потоком поднимаются к верхней поверхности. Там опять происходит распределение на два потока. Под движением этих потоков часть воздуха удаляется вытяжными воздухопроводами.

Другая часть, в виде гравитационных потоков, которые возникают при контакте с холодными вертикальными поверхностями внешних ограждений, циркулирует в пространстве между приточными струями и вытяжными, взаимодействуя с ними (рис.1).

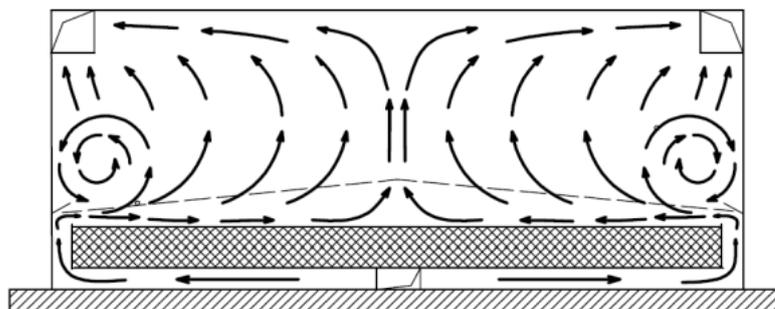


Рис.1. Физическая модель распространения воздушных потоков внутри теплицы

На основании общей теории свободных струй Г.Н. Абрамовича [3] введено понятие кинетической и тепловой характеристики, которая существенно упрощает задачу нахождения температурного поля и поля скорости. Им была предложена формула для свободной струи, расчет по которой хорошо соответствует достаточно удаленным от щели участкам.

Для плоской полуограниченной изотермической струи кинематическая характеристика равна:

$$M = \frac{0,433}{\sqrt{c}} \times \omega_0 \times \sqrt{\frac{F_0}{L}}, \quad (1)$$

где ω_0 – скорость в щели, м/с; c – эмпирическая константа для плоской струи, $c = 0,12$; F_0 – площадь щели, м²; L – длина щели, м.

Если провести уточнение формулы с учетом полуограниченности струи, а также с использованием понятия относительных координат, то получаем:

$$\bar{x} = \frac{x}{\delta}; \quad \bar{y} = \frac{y}{\delta}, \quad \text{где } \delta \text{ – ширина щели, м; } \delta = \frac{F_0}{L}.$$

Откуда,

$$M = 1,25 \times \omega_0 \times \sqrt{\delta}. \quad (2)$$

Приведенные выше решения позволяют использовать формулу без пространственных ограничений.

Следовательно, значение скорости в любой точке можно найти по формуле:

$$\omega = \frac{M}{\sqrt{x \times L_0}} \times ch^{-2} \times \left(c \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right), \quad (3)$$

где L_0 – единичная длина, м.

Вычисление, методика их проведения и анализ результатов.

Расчеты проводились для двух режимов:

1) при температуре вне зоны децентрализованного микроклимата, то есть в зоне обслуживания теплиц $t_{\text{зовн}} = 12^\circ\text{C}$:

$$\omega_0 = 0,22 \text{ м/с} \quad \Rightarrow \quad M = 0,174.$$

2) при температуре в зоне обслуживания теплиц $t_{\text{зовн}} = 15^\circ\text{C}$:

$$\omega_0 = 0,13 \text{ м/с} \quad \Rightarrow \quad M = 0,102.$$

Для струй, вытекающих из прямоугольных отверстий и настилающихся на поверхность, можно использовать формулы для плоской струи, но подставлять вместо полуширины сопла полное его значение.

Пограничный слой со стороны плоскости имеет незначительную ширину, а с внешней стороны он быстро разрастается, приобретая примерно вид плоской свободной струи.

Анализ характера движения воздушной струи внутри мини-теплицы позволяет сделать вывод о наличии таких характерных участков, присущих для развития конвективного потока, распространяется в замкнутом пространстве, как участок разгона, участок взаимодействия с нагретой поверхностью субстрата или отопительной поверхностью и охлажденными ограждающими поверхностями к участку разгона и так называемой «застойной зоны».

При использовании технологии децентрализованного обеспечения микроклимата задача определения температурного и скоростного распределения сводится к рассмотрению развития термогравитационных воздушных фонтанов в помещении за пределами теплиц. При расположении мини-теплиц над приборами общего отопления, решение такой задачи осложняется тем фактором, что после первой зоны развития воздушного фонтана (над приборами системы отопления), во второй зоне воздушные струи испытывают влияние источника теплоты, в нашем случае, это теплицы (рис.2).

Для аналитического решения внешней задачи нахождения профилей скоростей и температур в сечениях конвективных потоков используем гиперболические функции, справедливые для плоских потоков свободной и вынужденной конвекции:

$$\omega = \omega_z \times ch^{-2} \lambda; \quad (4)$$

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}_z \times ch^{-1} \lambda, \quad (5)$$

где ω – скорость в произвольной точке фонтана с координатами y и z , м/с; ω_z – скорость внутри поперечного сечения на уровне z ($y = 0$), м/с; \mathcal{G} – избыточная температура в произвольной точке воздушного фонтана с координатами y и z :

$\vartheta = t - t_{\infty}$, °C, где t_{∞} – значение избыточной температуры в зоне вне влияния воздушной струи, °C; ϑ_z – избыточная температура внутри поперечного сечения струи на уровне z ($y = 0$), °C, $\vartheta_z = t_z - t_{\infty}$, °C; λ – полярная координата, $\lambda = \frac{y}{c \cdot z}$, где c – исследовательская константа равная $c = 0,04$.

Наличие гиперболического косинуса в правой части обусловлена близостью реального распределения температур кривой $\vartheta = f(ch^{-1}\lambda)$, причем, угловой коэффициент λ выражает угол раскрытия кривой распределения. Этот коэффициент регламентирует изменение температуры в зависимости от вертикальной (z) и горизонтальной (y) координат, причем нулем сетки которой выступает точка, расположенная у источника теплоты, соответствует максимальным значениям скорости и избыточной температуры. Анализируя характер развития конвективной струи, сделан вывод, что значение избыточной температуры ϑ будет уменьшаться при удалении от оси струи симметрично по горизонтали, и при удалении от источника теплоты - по вертикали.

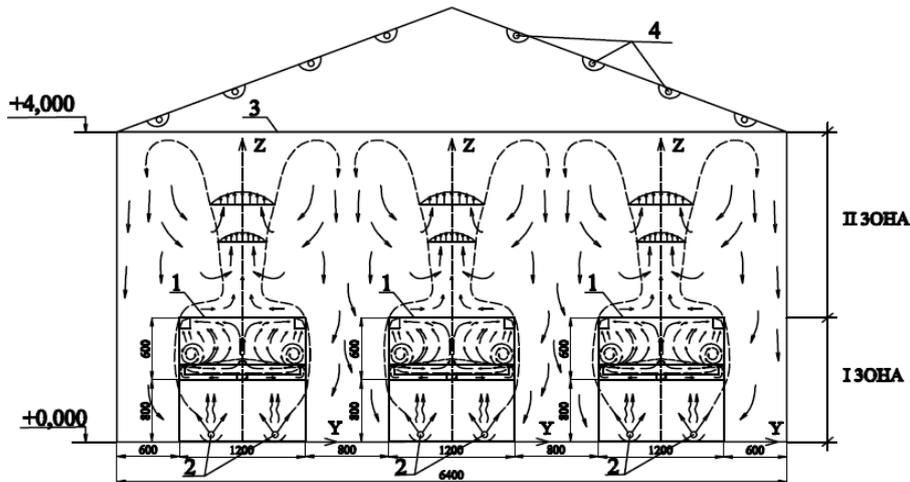


Рис. 2. Физические модели распространения воздушных струй в теплице:

- 1 - мини-теплицы; 2 - трубы системы отопления теплицы;
- 3 - шторный экран; 4 - излучатели периодического действия (для таяния снега)

В основу анализа положены следующие предположения:

- источники теплоты (трубы системы отопления и теплоотдающих поверхности теплиц) моделируются, как концентрические источники теплоты;
- скорость и температура воздушного потока по оси x не изменяются;
- в первой зоне (от труб системы отопления в теплице) тепловой поток равен теплоотдаче труб системы отопления под теплицей, что рассматривается: $Q_o = Q_{c.o.}$, а во второй зоне тепловой поток равен сумме теплового потока в первой зоне и теплоотдачи теплицы:

$$Q_o = Q_{c.o.} + Q_{m-m};$$

- тепловой поток в поперечных сечениях фонтана в каждой зоне постоянный и равен тепловому потоку в начале истечения, то есть

$$Q_z = Q_o = const. \quad (6)$$

Прирост количества движения массы воздуха, перемещаемого между двумя поперечными сечениями, равен действующей между этими сечениями подъемной (архимедовой) силы, то есть

$$dI_z = dP_z. \quad (7)$$

Итак, можем определить значение отдельных членов в уравнениях (6) и (7).

Конвективный тепловой поток в поперечном сечении на высоте z :

$$Q_z = \int_0^{\infty} \rho w h f = \int_0^{\infty} \rho w C_p \vartheta df = 2 \rho_{\infty} C_p l \vartheta_z w_z \int_0^{\infty} c h^{-3} \left(\frac{y}{c z} \right) dy =$$

$$= \frac{\pi \rho_{\infty} C_p l \vartheta_z w_z c z}{2}, \quad (8)$$

где ρ – средняя плотность воздуха, кг/м^3 ; C_p – изобарная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{К}}$; l – длина рабочего блока, м; ρ_{∞} – плотность воздуха вне воздушной струи, кг/м^3 .

Количество движения массового расхода воздуха, перемещаемого через z :

$$I_z = m w = \rho V w = \rho_{\infty} \int_0^{\infty} w df w = \rho_{\infty} \int_0^{\infty} w^2 2 l dy =$$

$$= 2 \rho_{\infty} l w_z^2 \int_0^{\infty} c h^{-4} \left(\frac{y}{c z} \right) dy = \frac{4}{3} \rho_{\infty} w_z^2 l c z. \quad (9)$$

Прирост количества движения по высоте:

$$dI_z = d \left(\frac{4}{3} \rho_{\infty} w_z^2 l c z \right) = \frac{4}{3} \rho_{\infty} l c w_z \left(2 z dw_z + w_z dz \right). \quad (10)$$

Подъемная сила равна:

$$dP_z = \left(\int_0^{\infty} (\rho_{\infty} - \rho) g df \right) dz = \left(\int_0^{\infty} \beta \rho_{\infty} \vartheta g df \right) dz = \frac{\pi \rho_{\infty} \vartheta_z g l c z}{T_{\infty}} dz. \quad (11)$$

Получаем систему уравнений для определения величин w_z и ϑ_z :

$$\begin{cases} \frac{\pi c \rho_{\infty} C_p l \vartheta_z w_z z}{2} = Q_0 \\ w_z \left(2 z dw_z + w_z dz \right) = \frac{3 \pi g \vartheta_z z}{4 T_{\infty}} dz \end{cases} \quad (12)$$

Приводим к стандартному линейному дифференциальному уравнению Бернулли:

$$w_z \left(2 z dw_z + w_z dz \right) = \frac{3}{2} \frac{Q_0 g}{T_{\infty} c \rho_{\infty} C_p l} \frac{dz}{w_z}.$$

Откуда

$$w_z = \sqrt[3]{\frac{3 Q_0 g}{2 T_{\infty} c \rho_{\infty} C_p l}}. \quad (13)$$

Значение избыточной температуры внутри поперечного сечения струи на уровне z ($y = 0$) определяем по формуле:

$$g_z = \frac{2Q}{\pi c \rho_\infty C_p l z} \cdot \sqrt[3]{\frac{2T_\infty c \rho_\infty C_p l}{3Q_0 g}} = \frac{1}{z} \cdot \sqrt[3]{\frac{16Q_0^2 T_\infty}{3g \pi^3 c^2 \rho_\infty^2 C_p^2 l^2}} \quad (14)$$

Таким образом, используя эти зависимости можно найти распределения скоростей и избыточных (а значит и реальных) температур во всех точках:

$$\left\{ \begin{array}{l} w = \sqrt[3]{\frac{3q_0 g}{2T_\infty c \rho_\infty C_p}} \cdot ch^{-2} \left(\frac{y}{cz} \right) \\ g = \sqrt[3]{\frac{16q_0^2 T_\infty}{3g c^2 C_p^2 \rho_\infty^2}} \cdot \frac{1}{\pi z} \cdot ch^{-1} \left(\frac{y}{cz} \right) \end{array} \right. \quad (15)$$

где q_0 – линейная плотность теплового потока источника теплоты, Вт/м; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²; T_∞ – температура воздуха в области вне зоны влияния струи, К; C_p – средняя изобарная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); ρ_∞ – плотность воздуха вне воздушной струи, кг/м³; z – вертикальная координата, м; y – горизонтальная координата, м.

Средняя температура по плоскости сечения yz определялась зависимостью:

$$\bar{t} = t_\infty \pm \bar{g} = t_\infty + \frac{1}{2f} \int_{-\infty}^{\infty} B ch^{-1} f df, \text{ де } f = (25y_{max} + 1)z_{max}. \quad (16)$$

Схема развития воздушных потоков может быть описана следующим образом: воздух с температурой 13-14°C от потоков, опускаются вниз, подходит к трубам системы водяного отопления, которые расположены под теплицами и в теплых воздушных струях, образующихся над этими трубами. Температура потока у зоны расположения теплиц составляет примерно 15°C; затем поток воздуха нагревается при обтекании теплиц до температуры около 20°C и поднимается вверх до встречи с холодным воздухом, опускается от шторного экрана, смешивается с ним. После этого воздушный поток с температурой 13-14°C опускается вниз, где нагревается при контакте с трубами системы отопления и при смешивании с струями нагретого воздуха над трубами и так далее. У наружных вертикальных ограждений струя опускается, и еще дополнительно охлаждается при контакте с ними в 10°C.

Обобщение результатов физического моделирования тепловых и воздушных режимов позволяет утверждать, что наибольший градиент температур наблюдается по центру теплицы (по оси z). В зоне над ними градиент температур незначительный и не превышает 3°C непосредственно по оси z , а обратный градиент наблюдается через 0,3м от оси z . С удалением от оси температура воздуха практически равна температуре в рабочей зоне теплицы. Такое положение касается и температуры охлажденного при контакте с шторным экраном потока воздуха, поступающего к внутренней поверхности наружных ограждений. Скорость воздушного потока по оси z над теплицами и в общем объеме теплицы находится в диапазоне 0,3...0,8 м/с. В пространстве между шторным экраном и наклоненными поверхностями кровли устанавливаются трубы с экранами, за счет чего поддерживается температура 3-5°C в этом объеме и включается на полную мощность в периоды интенсивных снегопадов.

Заключение

Подводя итоги, можно сделать выводы:

1. Обоснована целесообразность разработки системы децентрализованного обеспечения микроклимата и разработан усовершенствованный метод выращивания рассады

и низкорослых растений в мини-теплицах с автоматическим созданием и поддержанием индивидуальных температурно-влажностных и скоростных параметров воздуха и нужного темпа подачи питательного раствора непосредственно в зону выращивания.

2. На основе совершенствования общей теории Г.Н. Абрамовича [3], разработаны уточненные физические модели распространения воздушных потоков и процессов тепломассообмена внутри теплиц, которые позволили создать системы децентрализованного обеспечения микроклимата, и на их основе проведены аналитические исследования этих процессов.

3. На базе уточненных физических моделей получены аналитические зависимости, позволяющие определять температурно-влажностные и скоростные параметры и кинетику процессов движения воздуха без пространственных ограничений, за счет введения понятия относительной координаты и кинематической характеристики струи.

4. Выполненный анализ существующих систем обеспечения микроклимата, а также распределение температур внутри теплицы при разных системах обогрева позволяет сделать вывод, что при воздушном отоплении с подачей воздуха в нижнюю зону температурное поле более равномерно по высоте, чем при верхнем обогреве.

Литература:

1. Ильяхин М. С. Теплоснабжение отраслей АПК / Н. С. Ильяхин. - М.: Агропромиздат, 1990. – С.175
2. Теплицы и тепличные хозяйства: справочник / под ред. Г. Г. Шишко. - Киев: Урожай, 1993. – С.421
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика/М., "Наука", 1976. – С. 888