

УДК 536.24

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ИНКУБАТОРАХ Д. Мишра , В.С. Пичулин

Современное птицеводство поставлено на промышленную основу. Промышленные инкубаторы могут содержать десятки тысяч яиц. Яйцо является живой клеткой, которое обменивается с окружающей средой парами воды, углекислым газом и кислородом. Для выведения цыпленка необходимо создать среду, благоприятную для этого процесса, и прежде всего по температурным параметрам. Температура инкубирования лежит в узком диапазоне $37,5 \pm 1\text{C}$. Отклонение от номинальной температуры в большую или меньшую сторону ведет к гибели зародыша. В данной статье описываются математические модели промышленных инкубаторов имеющие продольную систему вентиляции, даются методики решения и проводятся расчеты подтверждающие этой методики.

1. Введение

Промышленные инкубаторы представляют собой внушительные сооружения. Схема одного из инкубаторов приведена на рис.1 [1]. На рис.1 показаны основные направления потоков вентиляционного воздуха и расположение нагревательных элементов. Поскольку речь идет об инкубировании десятков тысяч яиц одновременно, то отклонения от номинальной температуры в некоторых зонах инкубатора чревато гибелью зародышей в этих зонах. Можно считать, что процент погибших зародышей прямо пропорционален объему неблагоприятной зоны. Уменьшение объема таких зон ведет в увеличению выхода продукции. При объемах производства, характерных для птицефабрик, увеличение полезного выхода даже на несколько процентов дает большой экономический эффект.

В работе ставится задача исследовать поле температур в инкубаторе и влиянии на него схемы вентиляции и окружающих условий. Окружающие условия для инкубаторов можно условно разделить на два вида:

- для стран с умеренным климатом температура окружающей среды ниже температуры инкубирования;
- для стран с тропическим климатом температура окружающей среды может быть равна или выше температуры инкубирования.

В настоящее время производители инкубаторов указанное обстоятельство, как правило, не учитывают. Нередко при установке инкубатора, выпущенного в северной стране,

в тропической стране, приходится оборудовать цех мощной системой кондиционирования, обеспечивающей в помещении температуру ниже температуры инкубирования. Такое решение вопроса не представляется рациональным и экономичным.

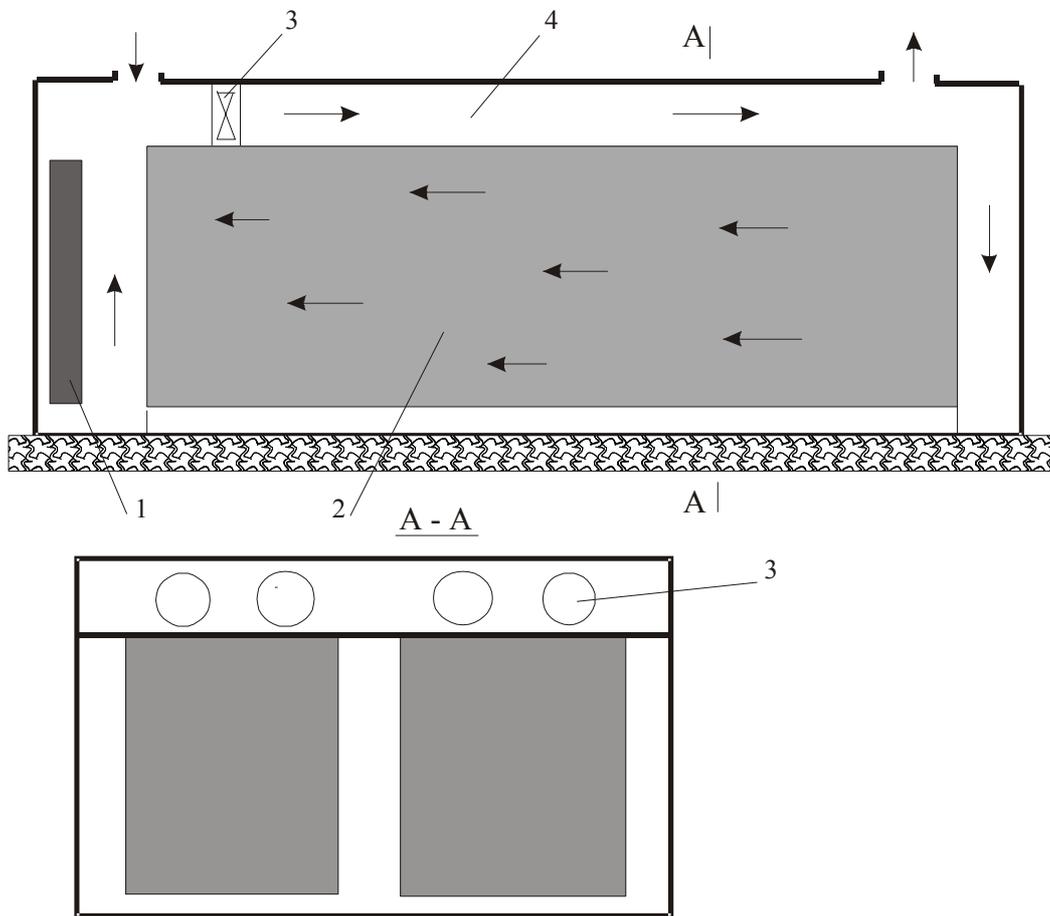


Рис.1 Схема инкубатора. 1- нагреватель (охладитель), 2 - зона инкубирования, 3 - вентилятор, 4 - вентиляционный канал.

2. Постановка задачи и расчетная схема инкубатора.

В работе исследуется поле температур в зоне инкубирования инкубатора, расчетная схема которого представлена на рис. 1. Зону инкубирования можно представить как пористую среду с коэффициентом пористости равной [4].

$$m = \frac{V - NV_{я}}{V},$$

N - число яиц,

$V_{я}$ - объем одного яйца,

V - объем зоны инкубирования.

Для выявления особенностей влияния условий на границах зоны инкубирования ограничимся на данном этапе рассмотрением плоской задачи.

Поле скоростей для зоны инкубирования можно считать равномерным по поперечному сечению (см. рис.1). Вертикальные скорости отсутствуют. Сделаем также предположение, что температура воздуха в зоне инкубирования и температура яиц одинаковы. Такое допущение можно принять ввиду того, что коэффициент теплопередачи от яиц к воздуху велик, и разностью температур можно пренебречь. Тогда уравнение для вычисления поля температур будет иметь следующий вид:

$$C\rho\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + U\frac{\partial T}{\partial x}\right) = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + q(x, y, \tau), \quad (2)$$

Где $C\rho = C_b\rho_b m + C_y\rho_y(1-m)$ - среднесмешанная теплоемкость зоны инкубирования,

$\lambda = \lambda_b m + \lambda_y(1-m)$ - тоже для теплопроводности,

C_b, ρ_b, λ_b - теплоемкость, плотность и теплопроводность воздуха,

C_y, ρ_y, λ_y - то же для яиц,

q - удельное тепловыделение яиц.

Для зоны инкубирования примем следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{при } x=0, \quad 0 < y < H, \quad T &= T_1; \\ \text{при } x=L, \quad 0 < y < H, \quad T &= T_2; \\ \text{при } y=0, \quad 0 < x < L, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} &= k_1(T_p - T); \\ \text{при } y=H, \quad 0 < x < L, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} &= k_2(T - T_k). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $k_1 = 1/(1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1)$ и $k_2 = 1/(1/\alpha_2 + \delta_2/\lambda_2)$,

где α, δ, λ - соответственно коэффициент теплоотдачи к стенке, толщина стенки и коэффициент теплопроводность нижней и верхней стенок зоны инкубирования.

Температуры T_1 и T_2 вычислим исходя из соотношений теплового баланса для соответствующих зон инкубатора. [2,3]. Для зоны нагрева (T_1) запишем:

$$C_H \frac{dT_1}{d\tau} = C_b G(T_L - T_1) + K S_H(T_\infty - T_1) + Q_H, \quad (4)$$

Здесь $C_H = C_b \rho_b V_H$ - полная теплоёмкость воздуха в зоне нагрева, V_H - её объем;

$C_b G$ - водяной эквивалент воздуха, G - массовый расход воздуха;

KS_H - коэффициент теплопередачи от зоны нагрева в окружающую среду;

T_∞ - температура окружающей среды;

T_L - средняя температура воздуха на выходе из зоны инкубирования;

Q_H - мощность нагревательных или охлаждающих устройств зоны нагрева.

Для зоны входа в зону инкубирования уравнение баланса тепла запишется аналогично:

$$C_B \frac{dT_2}{d\tau} = C_b G(T_{k2} - T_2) + KS_B(T_\infty - T_2). \quad (5)$$

Здесь коэффициенты имеют тот же смысл, что и для предыдущего уравнения. Уравнения (4) и (5) рассматриваются как краевые условия соответственно при выходе и входе зоны инкубирования.

Воздух, втекающий в зону инкубирования из вентиляционного канала 4 (рис. 1), будет или подогреваться или охлаждаться из-за теплообмена с окружающей средой через потолочное перекрытие. Ввиду его большой длины целесообразно вычислить изменения температуры вдоль него, воспользовавшись уравнением:

$$C_b \rho_b S_K \left(\frac{\partial T_k}{\partial \tau} + U_K \frac{\partial T_k}{\partial x} \right) = \lambda_b S_K \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} + kP_1(T_{y=H} - T_k) + kP_2(T_\infty - T_k), \quad (6)$$

Здесь $T(\tau, x)|_{y=H}$ - температура на верхней границе зоны инкубирования;

S_K - площадь поперечного сечения вентиляционного канала;

kP_1, kP_2 - коэффициенты теплопередачи от зоны инкубирования и в окружающую среду.

Краевые условия для уравнения (6), в соответствии с решаемой задачей, имеют вид:

$$x = 0, \quad T_k = T_L,$$

$$x = L, \quad \frac{\partial T_k}{\partial x} = 0.$$

Температура на входе в зону инкубирования для уравнения (5) определяется как

$$T_{k2} = T_k(\tau, L).$$

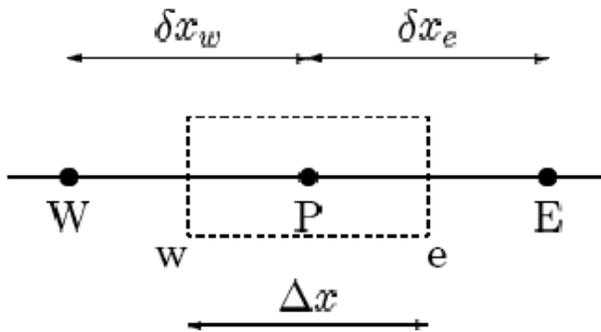
Для вычисления температуры воздуха, вытекающего из зоны нагрева в вентиляционный канал, необходимо вычислить интеграл

$$T_L = \frac{1}{H} \int_0^H T(\tau, L, y) dy.$$

В формулах (1) – (6) L – длина, H – высота зоны инкубирования.

3. Метод решения задачи.

Поставленная задача решалась методом конечных разностей на нерегулярной сетке. Сетка сгущалась соответственно к верхней и к нижней границе зоны инкубирования. Уравнения для конечных разностей записывались методом контрольного объема. Покажем технику получения уравнений метода на примере одномерного стационарного уравнения теплопереноса. Схема контрольного объема представлена на рисунке.



Уравнение (2) примет вид:

$$\frac{d}{dx}(c\rho UT) = \frac{d}{dx}\left(\Gamma \frac{dT}{dx}\right) + S \quad (7)$$

Интегрируя по оси x , получим следующую аппроксимацию конвективного члена левой части:

$$\int_w^e \frac{d}{dx}(c\rho UT) dx = (c\rho UT)_e - (c\rho UT)_w \quad (8)$$

Предполагая, что поле скоростей U задано после решения Навье – Стокса, можно аппроксимировать T_e и T_w посредством линейной интерполяции. Для восточной грани получаем:

$$(c\rho UT)_e = (c\rho UT)_e T_p, \quad (9)$$

где для конвективного потока $(c\rho U)$ применена схема центральных разностей, а температуры T аппроксимированы по другой разностной схеме. При использовании схемы центральных разностей для T получаем:

$$(\rho UT)_e = (\rho U)_e T_e \quad \text{где } T_e = f_x T_E + (1 - f_x) T_P \quad (10)$$

где f_x - интерполяционный весовой коэффициент, который принимаем равным 0.5 и считаем постоянным для интервал сетки. Предполагая равномерным интервал дискретизации (т.е. $\delta x_e = \delta x_w = \Delta x$) получаем:

$$(\rho U)_e \frac{T_E + T_P}{2} - (\rho U)_w \frac{T_P + T_w}{2}$$

Аналогично проводим преобразования и для правой части уравнения (7).

Соответствующая аппроксимация примет вид:

$$\Gamma_e \frac{(T_E - T_P)}{\delta x_e} - \Gamma_w \frac{(T_P - T_w)}{\delta x_w} + \overline{S \Delta x}. \quad (11)$$

В итоге получим следующее конечно - разностное уравнение, разрешенное относительно T_P :

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + S_U$$

где коэффициенты имеют вид:

$$a_E = \frac{\Gamma_e}{\delta x_e} - \frac{1}{2}(\rho U)_e, \quad a_W = \frac{\Gamma_w}{\delta x_w} + \frac{1}{2}(\rho U)_w, \quad S_U = \overline{S \Delta x}, \quad a_P = \frac{\Gamma_e}{\delta x_e} + \frac{1}{2}(\rho U)_e + \frac{\Gamma_w}{\delta x_w} - \frac{1}{2}(\rho U)_w.$$

Для сходимости решения необходимо, чтобы a_P - сумма соседних коэффициентов была больше $a_E + a_W$, поэтому получаем $a_P = a_E + a_W$.

Разностные схемы должны быть устойчивы и сходиться к точному решению. Для этого должны выполняться следующие условия:

- консервативности: поток выходящий через грань e должен быть равен потоку через грань w (см. рис); это требования выполняется автоматически для метода контрольных объемов.

- Физичность: для восточной грани это значит, что T_e не может быть меньше (больше) чем значения в ячейках, использованных при вычислении T_e ; другими словами все коэффициенты должны быть положительными.

Переход к двумерной задаче строиться аналогично. Уравнение для контрольного объема запишется в форме:

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + S_U$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S - S_P$$

$$S_U = q \Delta x \Delta y$$

Система уравнений решалась в среде MATLAB 6.5 SP1 для стационарного случая с использованием гибридной (смешанной) схемы на нерегулярной сетке размерностью 27x27.

4. Результаты решений и обсуждение.

Для тестирования разработанной методики решения уравнения энергии применительно к анализу процессов в инкубаторах, были решены ряд тестовых задач. При решении предполагалось, что поле скорости равномерно распределено по поперечному сечению укладки яиц. Коэффициент пористости для зоны инкубирования принят равным $M=0.1$, длина по полу $L= 6.54\text{м}$. высота $H= 1.85\text{ м}$.

Результаты расчетов представлены ниже на рис. 2, 3, 4, 5. Представлены распределения температур в зоне инкубирования, температуры в продольных и поперечных сечениях для различных сечений. Условия расчетов приведены на рисунках.

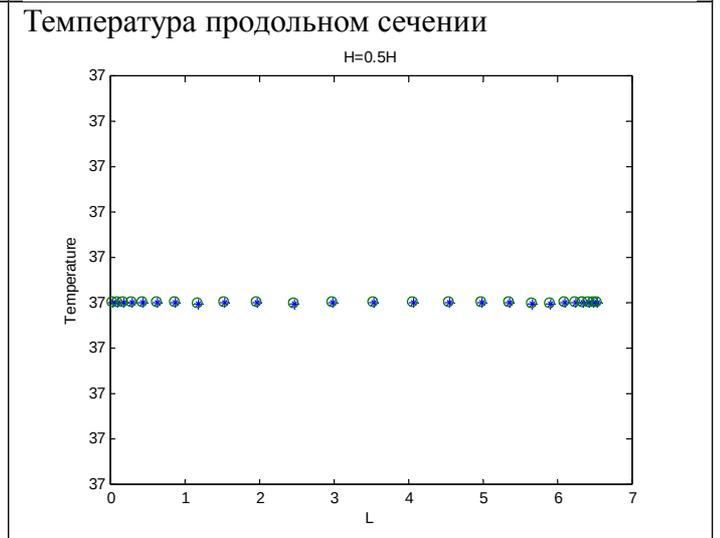
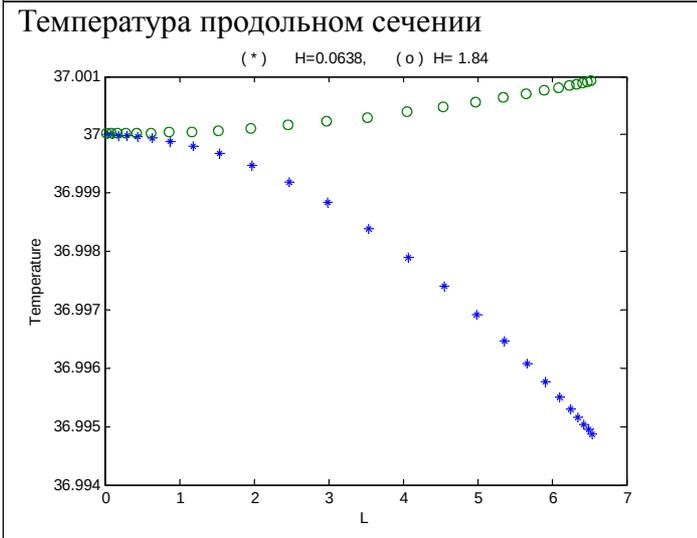
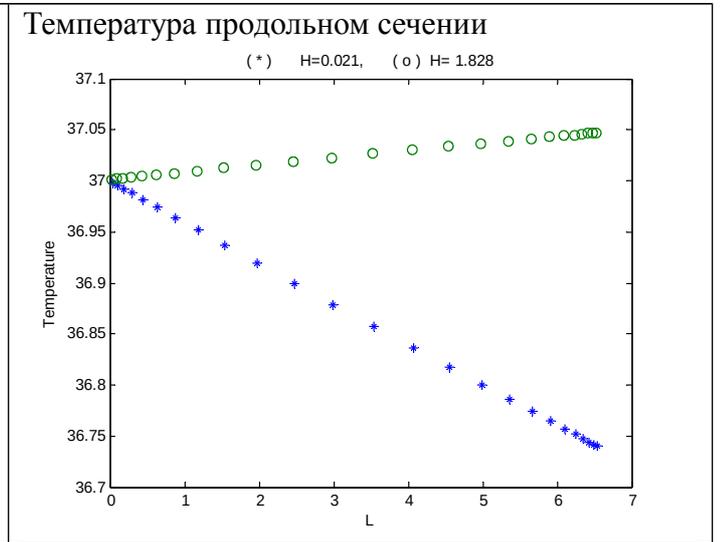
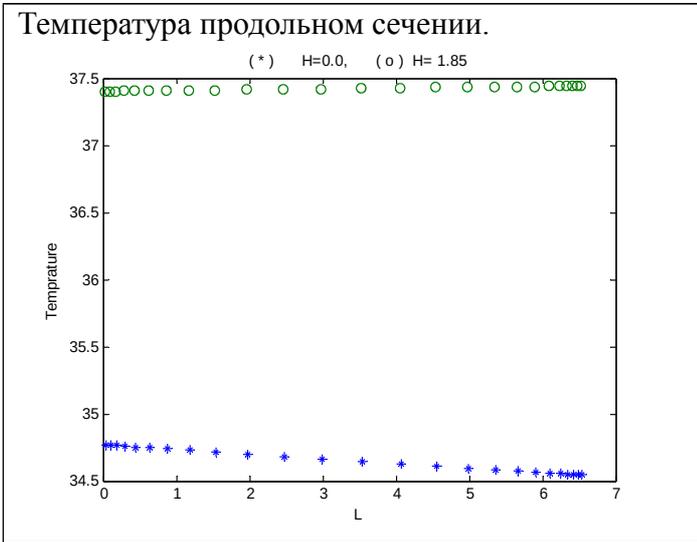
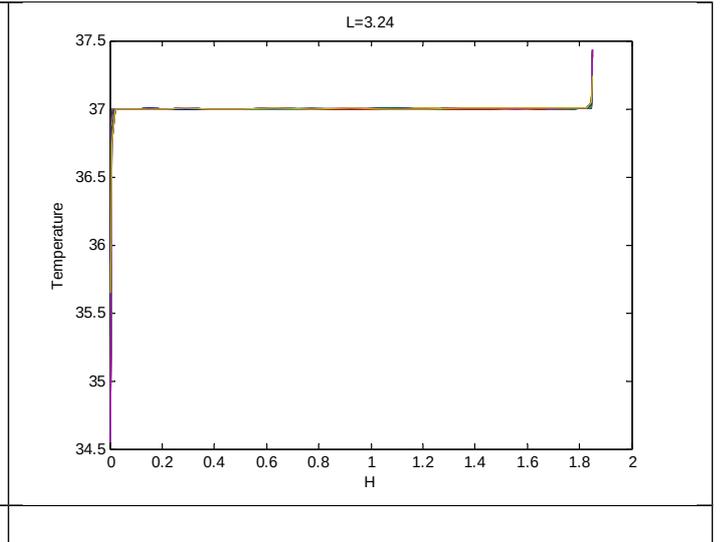
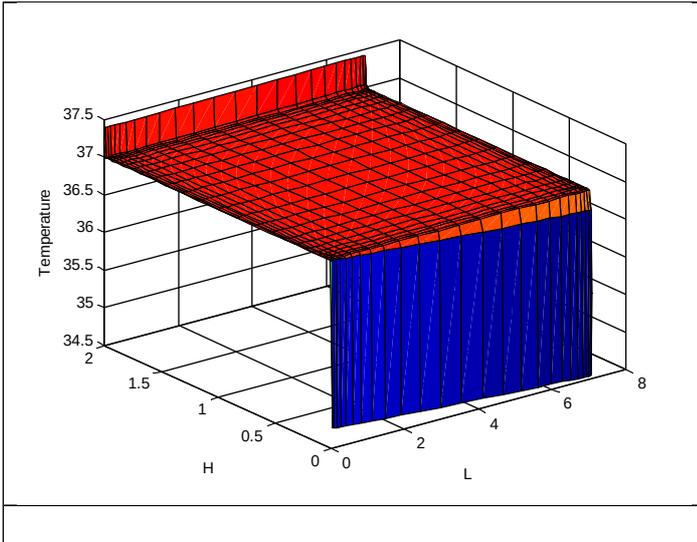
Результаты расчетов при симметричных краевых условиях на нижней и верхней границе зоны инкубирования показаны на рис. 2. Видно, что условия симметрии поля температур выполняются для всех поперечных сечений. Изменение температур вблизи нижней и верхней границы зоны совпадают. Как и ожидалось, разница температур в пределах зоны инкубирования незначительна.

Результаты для несимметричных условий теплообмена при отсутствии тепловыделений яиц показаны на рис. 3. Поля температур адекватны поставленным краевым условиям. Соответственно на рис. 4 и рис. 5 представлены результаты расчетов для симметричных и несимметричных краевых условиях при ненулевых тепловыделениях яиц. Полученные результаты также соответствуют поставленным краевым условиям.

Анализ полученных результатов показывает, что поля температур вблизи границ зоны инкубирования не соответствуют требуемым. Причем с уменьшением скорости продувки зона, неблагоприятная для выведения цыплят поскольку температура в краевых зонах увеличивается. Минимальная скорость определяется из расхода воздуха обеспечивающий необходимое количество кислорода O_2 , которое равно 0.54л/день [1]. Из результатов видно, что данная схема вентиляции не обеспечивает требуемого уровня равномерности распределения температуры в зоне инкубации.

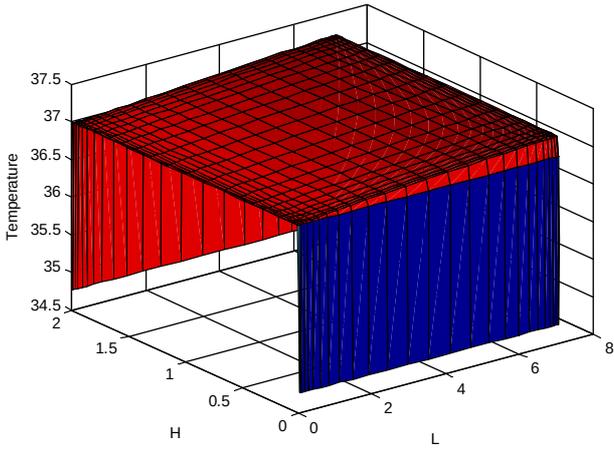
$$Q = 0, U = 0.5\text{ м/с}, T_{pol} = 20^{\circ}\text{C}, T_{okr} = 20^{\circ}\text{C}, T_{in} = 37^{\circ}\text{C}$$

Поле температур	Температура в поперечном сечении
-----------------	----------------------------------

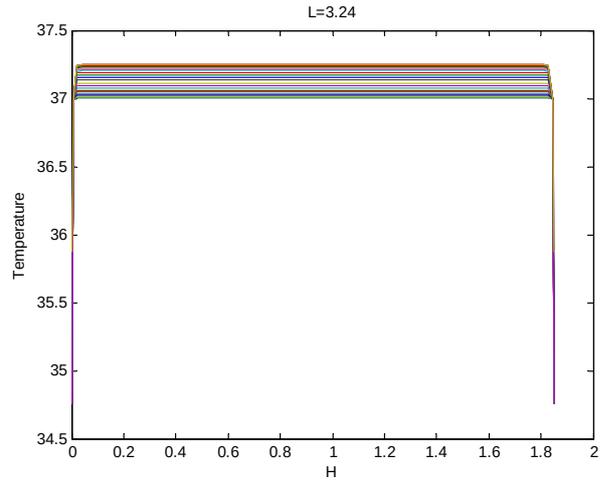


$$Q = 100mW, U = 0.5m/s, T_{pol} = 20^0C, T_{okr} = 20^0C, T_{in} = 37^0C$$

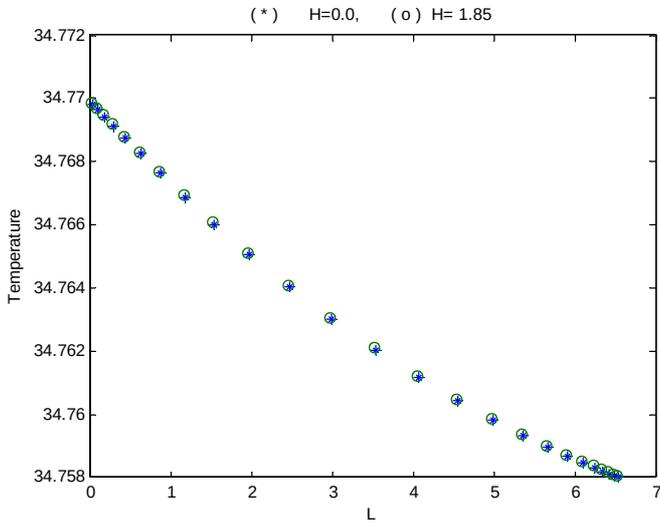
Поле температур



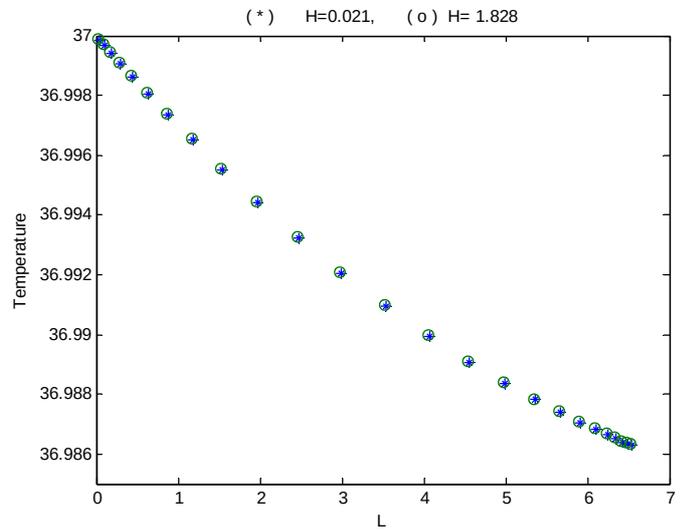
Температура в поперечном сечении



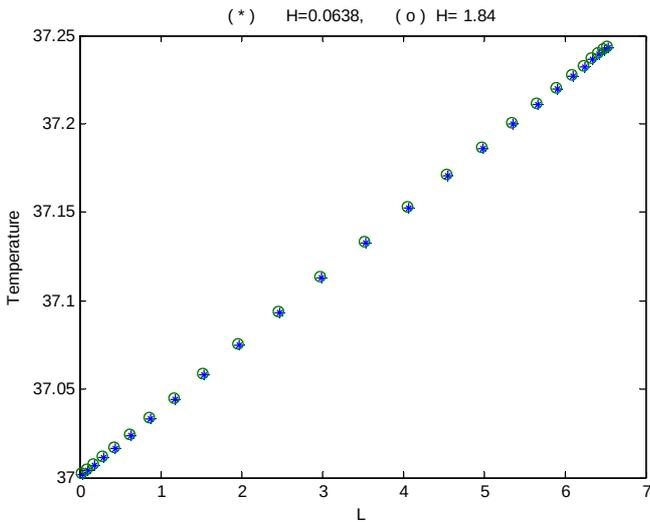
Температура продольном сечении



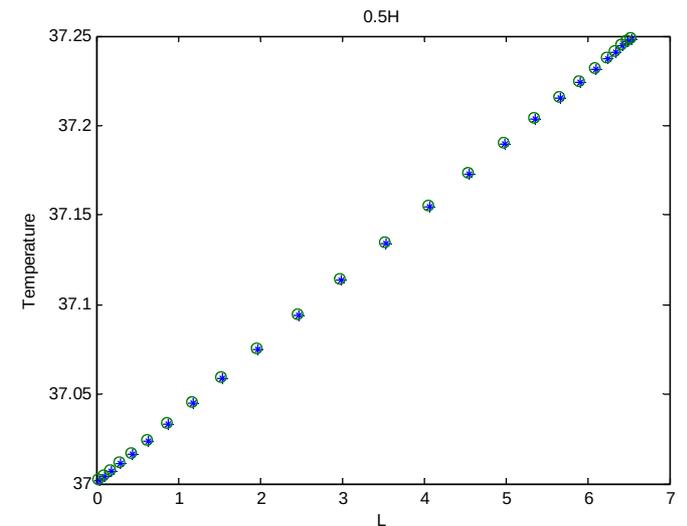
Температура продольном сечении



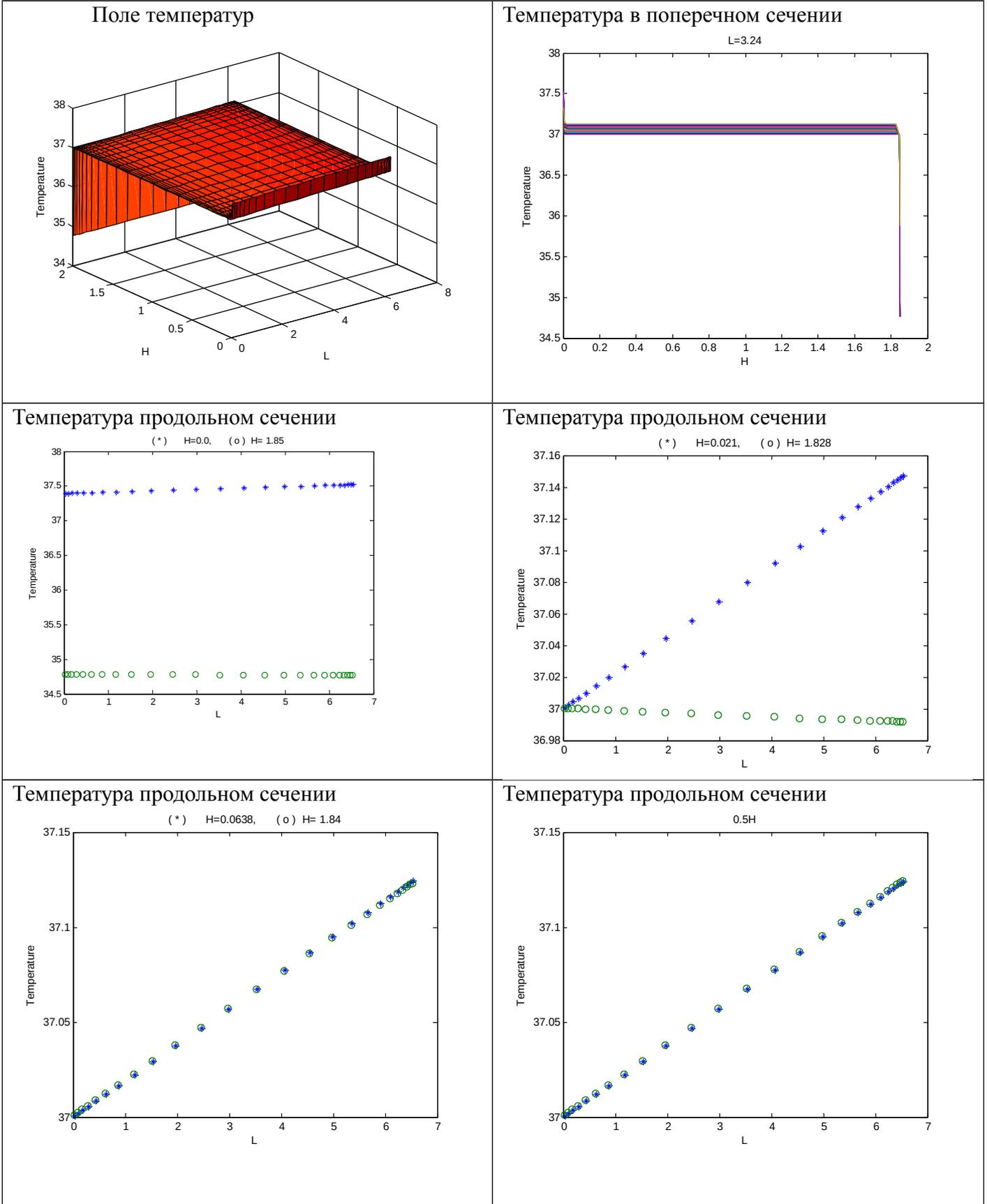
Температура продольном сечении



Температура продольном сечении



$$Q = 100mW, U = 1m/s, T_{pol} = 40^{\circ}C, T_{okr} = 20^{\circ}C, T_{in} = 37^{\circ}C$$



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1969.-438с.
 2. Малозёмов В.В., Рожнов В.В., Правецкий В.Н. Системы жизни деятельности экипажей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1986. -584с.
 3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984.-186с.
 4. Пичулин В.С., Течение и транспорт жидкостей в элементах агрегатов систем обеспечения жизни деятельности. – М.: Москва, 1984.-61с.
-

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пичулин Владимир Сергеевич, доцент кафедры системы жизнедеятельности и защиты в летательных аппаратах Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н.

Мишра Девашиш, аспирант кафедры системы жизнедеятельности и защиты в летательных аппаратах Московского авиационного института (государственного технического университета)