

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hinze J. O., Milborn H. Atomization of Liquids by Means of a Rotating Cup.— J. Appl. Mech., 1950, v. 17, N 2, p. 145—153.
2. Гейзли К., Чарват А. Поведение тонкой пленки жидкости на вращающемся диске.— В кн.: Тепло- и массоперенос. Минск: Изд. ин-та теплообмена АН БССР, 1968, т. 10, с. 401—419.
3. Поваров О. А., Васильченко Е. Г., Петров П. Г. Волновые течения тонких слоев жидкости в поле центробежных сил.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1978, № 1, с. 172—176.
4. Минимальная плотность орошения теплообменной поверхности центробежного испарителя / П. А. Барабаш, А. А. Мужилко, В. Г. Риферт и др.— В кн.: Теплопроводность и конвективный теплообмен.— Киев: Наукова думка, 1980, с. 59—63.
5. Мужилко А. А. Исследование некоторых закономерностей гидродинамики пленки жидкости на вращающемся диске.— В кн.: Теплообмен в одно- и двухфазных средах.— Киев: Наукова думка, 1981, с. 50—53.
6. Бендат Дж., Пирсон А. Измерение и анализ случайных процессов.— М.: Мир, 1974.—464 с.
7. Grauer H. Stromung und Wärmeübergang bei Reiselfilmen.— VDI, Forschungs, 1956, N. 457, s. 1—40.
8. О расчете волновых характеристик стекающей пленки жидкости / Л. П. Холпанов, В. Я. Шкадов, В. А. Малюсов и др.— ТОХТ, 1971, т. 5; № 4, с. 559—563.

Представлена кафедрой  
теоретической и промышленной теплотехники

[22.4.1981]

УДК 536.253

### РАСЧЕТ СКОРОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ СРЕДЫ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ С НАГРЕТОЙ ПЛОСКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*Канд. техн. наук, доц. СБИТНЕВА М. М.*

*Гомельский политехнический институт*

В замкнутом объеме с нагреваемой плоской поверхностью, если ее размеры сравнимы с размерами ограждающих конструкций, возникает движение среды, заключенной в нем. Направление, характер и скорость движения в стационарном режиме зависят от взаимной ориентации нагреваемой и ограждающих конструкций, величины нагреваемой площади, температурного напора и физических параметров заполняющей объем среды.

Большое количество факторов, влияющих на характер движения среды в объеме, приводит к тому, что обычно скорость и направление движения, если это необходимо, исследуют в натуральных условиях. Из-за значительных флуктуаций всех измеряемых величин необходим достаточно обширный сбор данных для статистической достоверности.

Вследствие этого такие эксперименты обычно дорогостоящи и длительны. Кроме того, изменение одного из перечисленных факторов или условий приводит к необходимости постановки новой серии экспериментов в натуральных условиях. Проведение эксперимента на модели страдает теми же недостатками.

Эксперименты по определению характера и скорости движения среды в замкнутом объеме обычно проводят при исследовании систем панельно-лучистого отопления и охлаждения, расчете теплообмена в холодильных камерах, в печах аэродинамического подогрева и т. д.

Большое количество дорогостоящих экспериментов, узкий круг применения их результатов, а также использование их при решении задач

теплообмена, вызвали необходимость создания метода приближенного расчета скорости среды в замкнутом объеме.

В данной работе рассматривается задача с вертикальным расположением нагреваемой плоской поверхности, которая является одновременно и одной из ограждающих объем.

Скорость у вертикальной нагретой поверхности в стационарном режиме можно определить из решения Польгаузена [1] системы дифференциальных уравнений, описывающих явления в динамическом и температурном пограничном слое при естественной конвекции для этого случая.

Вертикальная или продольная (направление оси  $x$ ) составляющая скорости зависит от расстояния от поверхности (координата  $y$ ) и записывается так:

$$u = 4vx^{0,5}c^2\zeta'(\eta), \quad (1)$$

где

$$c = \left[ g \frac{(T_n - T_{cp})}{4\nu^2 T_{cp}} \right]^{0,25}; \quad (2)$$

$\zeta'$  — функция, зависящая от безразмерной координаты  $\eta$  и определяющая функцию тока;

$$\psi = 4vcx^{0,75}\zeta(\eta) \quad (3)$$

— функция тока;

$$\eta = cyx^{-0,25} \quad (4)$$

— безразмерная координата.

В дальнейшем для удобства записи используем критерий Грасгофа ( $Gr$ ), тогда

$$\eta = \frac{x}{y} Gr_x^{0,25}; \quad \psi = 4v \left( \frac{1}{4} Gr \right)^{0,25} \zeta(\eta). \quad (5)$$

При этом продольная скорость

$$u = \zeta' \frac{2v}{x} Gr_x^{0,5}. \quad (6)$$

Скорость, с которой поток, сформированный в пограничном слое, отходит от нагретой поверхности, можно рассчитать по формуле (6), задаваясь конкретными значениями физических свойств среды, высотой нагретой поверхности и величиной температурного напора.

В качестве среды, заполняющей объем, примем воздух,  $P_r = 0,73$ . Максимальная продольная скорость потока по решению Польгаузена, приведенному в графической форме на рис. 1 и 2, будет при  $\eta = 1$ ;  $\zeta' = 0,27$ . Для конкретного примера возьмем данные, соответствующие условиям панельно-лучистого отопления и охлаждения в современных зданиях, т. е. температурный напор примем равным  $10^\circ C$ , высоту стенки  $2,5$  м, коэффициент кинематической вязкости воздуха  $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Максимальное значение продольной скорости потока в пограничном слое в конце нагреваемой поверхности, рассчитанное по формуле (6),  $0,5$  м/с.

Ее числовые значения на различных уровнях по высоте стенки занесены в табл. 1.

Таблица 1

$x$ , м	0	$0,2l=0,5$	$0,4l=1$	$0,6l=1,5$	$0,8l=2$	$l=2,5$
$u$ , м/с	0	0,23	0,32	0,39	0,45	0,5

Среднее значение продольной скорости равно  $0,33$  м/с.

Естественно, что свободная конвекция, возникающая у вертикальной стенки, находящейся в ограниченном замкнутом объеме, приводит к подвижности среды в нем. Потoki образуют некоторые замкнутые контуры.

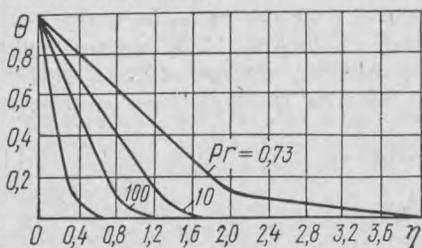


Рис. 1. Распределение температуры в пограничном слое на вертикально поставленной плоской пластинке при естественной конвекции;  $\eta = \frac{y}{x}(Gr_x)^{1/4}$ ;

$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_{ст} - T_\infty}$$

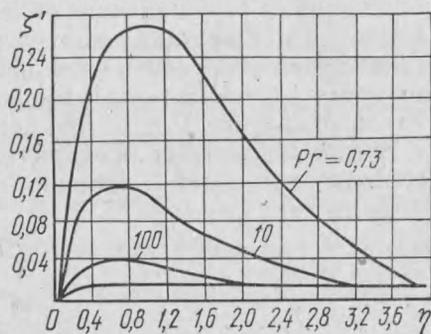


Рис. 2. Распределение скоростей в пограничном слое на вертикально поставленной нагретой плоской пластинке при естественной конвекции;

$$\zeta' = \frac{u}{2\sqrt{gx}} \sqrt{\frac{T_\infty}{T_{ст} - T_\infty}}$$

Нагретый у вертикальной поверхности поток поднимается вверх, движется вдоль ограждающей объем сверху поверхности, вытесняется оттуда вновь подошедшими потоками, опускается вниз и подсасывается на место

Нагреваемая поверхность



Рис. 3. Схема циркуляции воздуха в замкнутом объеме с нагреваемой вертикальной поверхностью

нагретыми у поверхности и уходящими в свою очередь вверх слоями среды. Образуются циркуляционные потоки, приблизительная схема которых показана на рис. 3.

На поверхности пограничного слоя при естественной конвекции у вертикальной нагретой поверхности, расположенной в неограниченном свободном пространстве, продольная составляющая скорости принимается равной нулю. В аналогичном случае в замкнутом объеме в рассматриваемых точках скорость равна скорости набегающего потока, вовлеченного в циркуляционное по объему движение среды.

При движении образующегося в пограничном слое потока среды в объеме он движется по законам затопленной струи, увеличивая размеры в поперечном сечении за счет вовлечения в движение соседних слоев. Кроме того, происходит потеря кинетической энергии потока за счет ее диссипации в результате внутреннего трения. Скорость потока уменьшается.

За расчетную скорость циркуляции примем скорость в середине опускающегося потока на полпути между верхней и нижней ограждающими поверхностями. Обычно в этом месте определяется подвижность среды в экспериментах, проводимых в натуральных условиях и на моделях.

Ламинарный поток пограничного слоя, отрываясь от стенки и двигаясь по закругленному пути циркуляции, взаимодействуя с соседними

слоями среды, турбулизируется и в дальнейшем рассматривается как затопленный свободный турбулентный. Исходные данные для определения его скорости — физические свойства среды и значения критерия Грасгофа в конце обогреваемого участка вертикальной поверхности.

Для расчета скорости воспользуемся формулой для затопленного свободного турбулентного потока [2]:

$$u_{ц} = \frac{u_l}{1 + 2 \frac{X}{D_l} \operatorname{tg} \alpha}, \quad (7)$$

где  $u_{ц}$  — скорость циркуляции, м/с;

$u_l$  — продольная скорость в пограничном слое в конце обогреваемого участка вертикальной поверхности, м/с;

$X$  — координата вдоль потока, отсчитываемая от конца обогреваемого участка поверхности, м ( $X = x - l$ );

$D_l$  — начальная ширина потока, равная толщине пограничного слоя при свободной конвекции в конце обогреваемой поверхности, м;

$\alpha$  — величина угла одностороннего расширения потока.

Скорость в конце обогреваемого участка можно определить по формуле (6), положив  $x = l$ :

$$u_l = \zeta' \frac{2\nu}{l} \operatorname{Gr}_l^{0,5}. \quad (8)$$

Начальную ширину потока рассчитаем из формулы (5) с учетом данных Польгаузена, приведенных на рис. 2,

$$\eta_l = \frac{y}{x} (\operatorname{Gr}_x)^{0,25} \Big|_{x=l} = \frac{D_l}{l} \operatorname{Gr}_l^{0,25} = 4. \quad (9)$$

Отсюда начальная ширина потока

$$D_l = \frac{4l}{\operatorname{Gr}_l^{0,25}}. \quad (10)$$

Угол одностороннего расширения потока при заданной скорости, вязкости среды и температурном напоре определен сформировавшимся пограничным слоем. Тангенс его можно рассчитать как

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D_l}{l} = \frac{4}{\operatorname{Gr}_l^{0,25}}. \quad (11)$$

Подставляя выражения (8), (10) и (11) в исходную формулу для расчета (7), определим скорость циркуляции

$$u_z = \frac{2\nu \zeta' \operatorname{Gr}_l^{0,5}}{l + 2X}. \quad (12)$$

Функция  $\zeta'$  определяется по графику на рис. 2.

Если продольная составляющая скорости в конце пограничного слоя подсчитана заранее, то расчетная формула (12) резко упрощается. Ее можно представить в виде

$$u_z = \frac{u_l}{1 + 2 \frac{X}{l}}. \quad (13)$$

Для примера определим скорость циркуляции в помещении с вер-

тикальной отопительной панелью высотой 2,5 м. Воспользуемся формулой (13), так как в табл. 1 приведено рассчитанное значение  $u_l$ . Координату  $X$  примем равной 1,5 м. Рассчитанная скорость циркуляции 0,2 м/с.

Если обогреваемый участок равен 0,5 высоты стенки, то путь потока до точки, в которой рассчитывается скорость циркуляции, удваивается и становится равным 3 м. Начальная скорость уменьшается до 0,35 (табл. 1). Скорость циркуляции будет равна 0,1 м/с.

Эксперименты в натуральных условиях для данного случая дали те же результаты 0,1 ÷ 0,2 м/с.

Статическое давление на протяжении циркулирующего потока одинаково и равно давлению окружающей среды. Поэтому количества движения в начале потока и в рассматриваемом сечении должны быть равны:

$$\rho Q_0 u_l = \rho Q u_z, \quad (14)$$

где  $\rho$  — плотность среды в объеме, кг/м<sup>3</sup>;

$Q$  — объемный расход среды, в свою очередь зависящий от скорости, м<sup>3</sup>/с.

Используя выражение (14), можно определить увеличение ширины потока на любом форсированном расстоянии от его начала.

$$\frac{\omega_l}{\omega_z} = \frac{u_z}{u_l}, \quad (15)$$

где  $\omega$  — площадь поперечного сечения потока, м<sup>2</sup>;

$u$  — скорость потока, м/с.

В качестве примера рассмотрим приведенную выше задачу. При уменьшении скорости в потоке от 0,5 до 0,1 м/с ширина потока увеличивается почти в 25 раз. Если его начальная ширина равна 5 см, то в дальнейшем он расширяется до 1,25 см, т. е. захватывает основную часть поперечного сечения площади (рис. 3). При этом улучшается перемешивание воздуха, выравнивается температура в объеме.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена методика для расчета скорости циркуляции среды в замкнутом объеме с нагреваемой вертикальной поверхностью.

2. В качестве примера рассмотрен случай с известным результатом из натуральных исследований.

3. Расчет по предложенной методике и известные данные натуральных экспериментов дали хорошее совпадение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: ИЛ, 1956.
2. Альтшуль А. Д., Киселев П. Г. Гидравлика и аэродинамика.— М.: Стройиздат, 1965.