

**ПРОФИЛИ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ
КОНВЕКЦИИ (ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ)****АННОТАЦИЯ**

Проведен анализ экспериментальных данных по профилям скорости и температуры на нормалях к теплоотдающим поверхностям технических устройств в условиях естественно-конвективного теплопереноса. Путем нового подхода получены обобщающие зависимости по профилям скорости и температуры.

1. ВВЕДЕНИЕ

При обосновании ядерных реакторных установок в рамках безопасности большое внимание уделяется отводу тепла послеаварийных ситуаций, соответствующего остаточному уровню мощности реактора. В этих условиях процесс теплообмена происходит за счет естественной конвекции. Нужна точная информация по коэффициентам теплоотдачи к поверхностям различных элементов внутриреакторных устройств. Часто принимается положение, что теплоотдача к стенкам устройств происходит только в пограничном слое. При решении уравнений, описывающих процессы переноса, используют интегральный метод и необходимые корреляции, например по [1].

Р. Чизрайт [2], сопоставляя экспериментально полученные профили скорости и температуры с теоретическими профилями Эккерта и Джексона [3], обращает внимание на то, что соответствие теории с экспериментом "гораздо менее удовлетворительно".

Расхождение между экспериментальными данными и теорией по профилям скорости и температуры в условиях естественной конвекции, особенно для турбулентного режима, по-прежнему остается проблемной задачей, решение которой требует практическая необходимость.

Потоки свободной конвекции под влиянием гравитационных сил встречаются в природе и инженерных технических устройствах.

Простейшим примером последнего является перенос тепла на вертикальной плите, размещенной в большом объеме. Если эту плиту разогреть до температуры $T = T_w$, то температура жидкости вблизи поверхности будет повышаться и жидкость начнет двигаться вверх. При этом свободноконвективные процессы в основном определяются движением и теплообменом в пристенной области, которая существенно меньше линейного размера пластины. Вводится понятие пограничного слоя по аналогии с вынужденным движением.

Ответ на вопросы по физике процессов в пристенной области могут дать прежде всего экспериментальные данные по профилям температуры и скорости.

**2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОЙ
КОНВЕКЦИИ**

Одно из первых исследований естественно-конвективного течения было проведено Гриффитсом и Дэвисом [4]. Они измерили как местные коэффициенты теплоотдачи, так и профили скорости и температуры в пристенном слое для воздуха при постоянной температуре стенки.

Продолжительное время экспериментальные данные [4] были единственными результатами измерения локальных характеристик течения. Спустя много лет Э. Шмидт и В. Бэкман [5] измерили профили локальной скорости и температуры для воздуха на вертикальных пластинках разных размеров.

Они показали, что локальная температура воздуха при удалении от пластины по нормали к стенке в сечениях, расположенных на различных расстояниях x от передней кромки, падает по экспоненте, а продольная скорость растет от нуля до максимума и затем уменьшается. С возрастанием высоты x скорость заметно увеличивается, одновременно максимум удаляется от пластины. Поток полностью ламинарный, хотя вблизи верхней кромки пластины наблюдали слабое проявление турбулентности.

Аналогичные закономерности наблюдались в экспериментах [4].

Случай вертикальной изотермической поверхности с температурой T_w , расположенной в покоящейся окружающей среде с температурой T_∞ , теоретически исследовал Э. Польгаузен с помощью уравнений пограничного слоя, соответствующих граничных условий с привлечением разработанного им математического аппарата. Это решение приведено в работе [5].

На рис. 1, 2 приведено сравнение экспериментальных данных с теорией. Температура и продольная скорость представлены в безразмерном виде в зависимости от безразмерной координаты η :

$$\theta = (T - T_\infty) / (T_w - T_\infty) = f(\eta); \quad (1)$$

$$U / 4\nu C^2 \sqrt{x} = f(\eta), \quad (2)$$

где $\eta = C \cdot y / \sqrt[4]{x}$; $C = \sqrt[4]{g(T_w - T_\infty) / 4\nu^2 T_\infty}$.

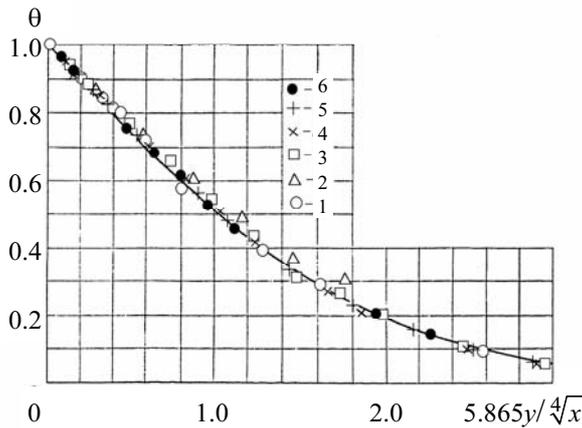


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных данных с теорией по распределению температуры в различных сечениях: 1—6 — $x = 0,3; 1; 2; 4; 7; 11$ см соответственно; — теория [5]

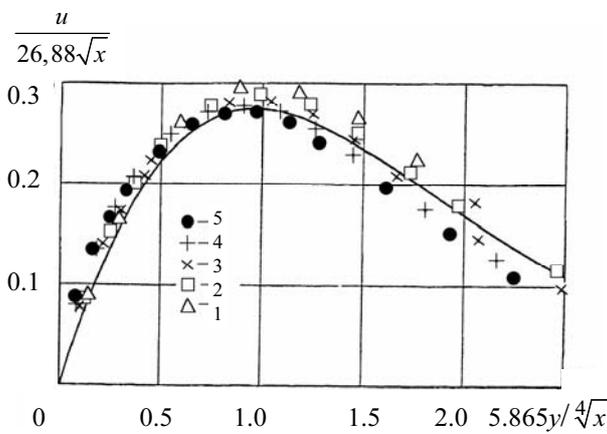


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных с теорией по распределению скорости в различных сечениях: 1—5 — $x = 1; 2; 4; 7; 11$ см соответственно, — теория [5]

Физпараметры воздуха, в частности кинематическую вязкость, принимали по средней температуре обогреваемой поверхности.

Э. Шмидт и В. Бекман [5], сопоставляя экспериментальные данные с расчетом, обращают внимание на некоторые несоответствия между ними. Так, на рис. 1 (профиль температуры) при хорошем общем согласии эксперимента с теорией в окрестности верхней поверхности пластины теоретическая кривая несколько круче, чем опытные данные. Это авторы [5] объясняют тем, что в расчетах принимали теплопроводность воздуха постоянной, в то время как в действительности она заметно увеличивается в окрестности пластины, где температура воздуха выше. Экспериментальные данные у нижнего торца пластины (малые значения x) хуже согласуются с теоретической кривой, так как в этом случае гипотеза, что толщина пограничного слоя меньше относительно расстояния (x) до нижней кромки, вблизи низа пластины, не выполняется.

На рис. 2 приведены безразмерные профили скорости для конкретных значений x , рассчитанные теоретически и полученные в экспериментах [5]. Видно, что согласование экспериментальных дан-

ных с теорией несколько хуже. Э. Шмидт и В. Бекман называют несколько причин: более сложная техника измерений; недостаточная точность измерения расстояния между кварцевой нитью и поверхностью пластины; влияние зарождающейся турбулентности во внешней части пограничного слоя и др.

Можно согласиться с объяснениями авторов [5] причин расхождения теории и эксперимента.

Но причину следует искать, вероятно, в правильности выбора масштаба обезразмеривания. Так, за масштаб температуры принята разность $T_w - T_\infty$. Здесь вопросов нет, ибо в данном случае физика процесса около вертикальной пластины определяется уровнем температуры поверхности T_w и температуры в окружающем объеме T_∞ .

В качестве масштаба скорости в [5] принято $U_0 = 2\sqrt{gx(T_w - T_\infty)/T_\infty}$. Принятое значение U_0 в [6] представляют в другом виде: $U_0 = (2gx\Delta\rho/\rho)^{1/2}$, что следует из баланса кинетической и потенциальной энергий. При этом пренебрегают силами вязкости и некоторыми другими явлениями. Так, по оценкам Б. Гебхарта и др. [6], в обычном поле тяготения при $x = 50$ см и относительной разности плотностей $\Delta\rho/\rho = 2\%$, максимальная скорость $U_0 = 44$ см/с. Но если учесть препятствующие течению и неизбежно действующие силы вязкости и подсосывание жидкости в потоке, примыкающем к нагретой вертикальной поверхности, то истинные значения скоростей будут равны $\sim 34, 17$ и 8 см/с для ртути, воды и воздуха соответственно.

Безразмерные профили температуры (рис. 1) и скорости (рис. 2) показывают расслоение для различных значений x , что свидетельствует о не совсем удачном выборе безразмерной координаты η .

Сказанное выше позволяет утверждать, что масштабы скорости и координаты y приняты не совсем корректно и есть необходимость решения этого вопроса.

3. ВЫБОР ХАРАКТЕРНЫХ МАСШТАБОВ И ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Наш практический опыт по обобщению экспериментальных данных, например [7], подсказывает, что в закономерностях изменения той или иной функциональной зависимости необходимо определить характерную точку, координаты которой следует принимать за масштабы.

В закономерностях изменения скорости для различных значений x , как было сказано выше, имеется характерная точка, в которой продольная скорость достигает максимального значения U_m , с соответствующей координатой y_m . Эта точка с координатами (U_m, y_m) позволяет течение вдоль вертикальной пластины разделить на две зоны: внутрен-

ною, прилегающую к стенке ($y \leq y_m$), и внешнюю, расположенную за максимумом скорости ($y \geq y_m$).

Представим закономерности изменения продольной скорости в новой системе координат $U/U_m = f(y/y_m)$ (рис. 3). Видно, что в пристенном слое экспериментальные данные группируются в единую зависимость, а во внешней зоне они распадаются.

Если во внешней зоне ввести новый масштаб y_n/y_m — значение y/y_m в точке, где $U/U_m = 0.368$, то экспериментальные данные также сгруппируются в единую зависимость.

Для математического представления профиля скорости введем новую переменную y^* , значение которой во внутренней и внешней зонах можно представить следующим образом:

$$y^* = y/y_m \text{ при } 0 \leq y/y_m \leq 1; \quad (3)$$

$$y^* = 1 + (y/y_m - 1)/(y_n/y_m - 1) \text{ при } y/y_m \geq 1. \quad (4)$$

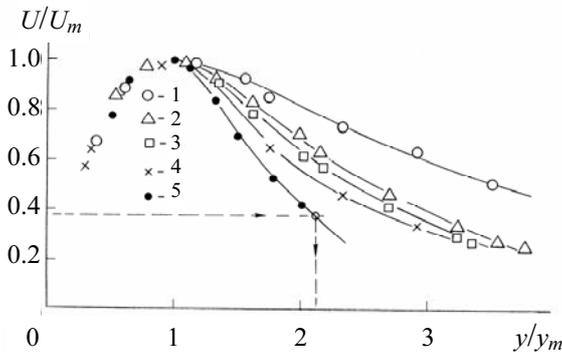


Рис. 3. Распределение скорости по нормали к стенке $U/U_m = f(y/y_m)$ для различных сечений: 1—5 — $x = 1; 2; 4; 7; 11$ см соответственно [5]

Экспериментальные данные работы [5] по профилям скорости в координатах $U/U_m = f(y^*)$ представлены на рис. 4. Видим, что получено достаточно хорошее обобщение. Закономерности изменения продольной скорости по нормали к поверхности можно представить в виде зависимостей:

— пристенная область, $0 \leq y^* \leq 1$

$$U/U_m = y^*(2 - y^*); \quad (5)$$

— внешняя область, $y^* \geq 1$

$$U/U_m = \exp\left[-(y^* - 1)^{5/4}\right]. \quad (6)$$

Результаты по профилям средних скоростей [2, 4, 8, 9] (турбулентный режим) также хорошо обобщаются зависимостями (5) и (6).

Для обобщения экспериментальных данных по профилям безразмерной температуры вместо координаты η введем координату $y^* = y/y_e$, где y_e

есть координата y , в которой безразмерная температура $\theta = 0.368$.

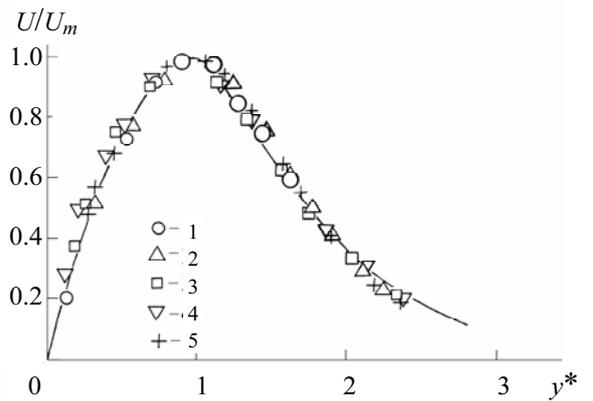


Рис. 4. Распределение скорости по нормали к стенке $U/U_m = f(y/y_m)$ для различных сечений: 1—5 — $x = 1; 2; 4; 7; 11$ см соответственно [5]; ——— — расчет по (5), (6)

Здесь следует заметить, что координаты этой характерной точки подтверждены экспериментами [10]. Максимум пульсации температуры по координате y соответствует точке профиля средней температуры, где $\theta = 0.368$. Это подтверждается также данными экспериментов [11].

Обобщение экспериментальных данных по профилям температуры проведено в виде безразмерной зависимости $\theta = f(y^*)$.

На рис. 5 приведены результаты обработки данных [5] для ламинарного режима. В этом случае профиль температуры достаточно хорошо обобщается зависимостью

$$\theta = \exp\left[-(y^*)^{5/4}\right]. \quad (7)$$

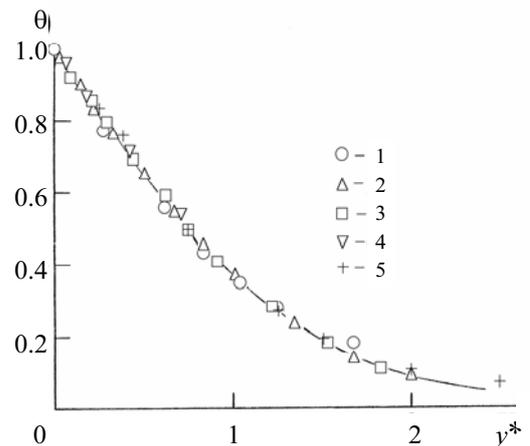


Рис. 5. Обобщение экспериментальных данных по профилям температуры: 1—5 — $x = 1; 2; 4; 7; 11$ см соответственно [5]; ——— — зависимость (7), ламинарный режим

Аналогичные результаты получены для ламинарного режима при обработке данных [2, 9] и др.

Обработка данных по профилям температуры для турбулентного режима (рис. 6) показывает некоторые особенности. Можно выделить две зоны:

— $y^* < 1$ — пристенная, где экспериментальные данные обобщаются зависимостью (7) (область ламинарного режима);

— $y^* > 1$ — внешняя, турбулентная, где экспериментальные данные обобщаются зависимостью типа (7), но показатель степени должен быть иным.

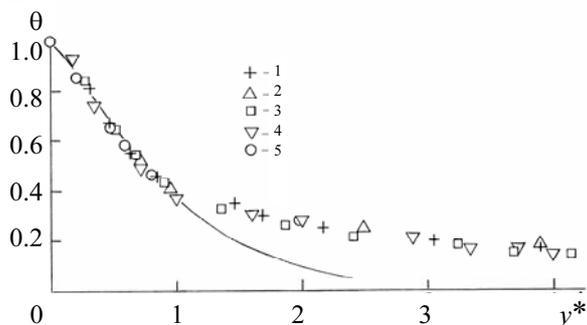


Рис. 6. Обобщение экспериментальных данных по профилям температуры (турбулентный режим): 1 — [2]; 2—5 — $x = 153; 220; 270; 348$ см соответственно [12]; — — — — зависимость (7)

Для уточнения численного значения показателя степени, очевидно, следует обратиться к результатам Ю.С. Чумакова [13] и провести дополнительный анализ экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ экспериментальных данных по профилям скорости и температуры в пограничном слое при естественной конвекции, что позволило установить характерные масштабы, которые дают основу для обобщения экспериментальных данных.

Получены простые обобщающие зависимости по профилям скорости и температуры для различных граничных условий.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

T — температура, °C;
 θ — безразмерная температура;
 U — скорость, см/с;
 x — расстояние от кромки поверхности, см;
 y — расстояние от обогреваемой поверхности, см;
 ρ — плотность, кг/м³;
 ν — кинематическая вязкость, м²/с;
 g — ускорение силы тяжести, м/с².
 Индексы:
 w — стенка пластины;
 ∞ — окружающие условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. (Перевод с английского, под ред. акад. АН БССР А.В. Лыкова). М.—Л.: ГЭИ, 1961. 680 с.
2. Чизрайт Р. Естественная турбулентная конвекция от вертикальной плоской поверхности // Теплопередача. 1968. Т. 90. № 1. С. 1.
3. Eckert E.R.G. and Jackson T.W. Analysis of Turbulent Free-Convection Boundary Layer on Flat Plate. NACA TN 2207, 1950.
4. Griffiths E. and Davis A.H. The Transmission of Heat by Radiation and Convection. British Food Investigation Board Special Report 9. DSIR, London, 1922.
5. Schmidt E., Beckman W. Das Temperatur — und Geschwindigkeitsfeld von einer Warme abgebenden senkrechten Platte bei natuerlicher Rjnvection. Forschg. Ing.-Wes. 1930. 1. 391.
6. Гебхарт Б., Джалури И., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. В 2-х книгах, кн. 1: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 678 с.
7. Матюхин Н.М., Сорокин А.П. Нестационарная естественная конвекция и проблемы моделирования устройств аварийного расхолаживания ЯЭУ // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену, 21—25 октября 2002 г. М.: Изд-во МЭИ, 2002. Т. 3. С. 108.
8. Дэйл И.Д., Эмери А.Ф. Теплоотдача от вертикальной пластины при свободной конвекции неньютоновских "псевдопластичных" жидкостей // Теплопередача. 1971. Т. 93. № 2. С. 33.
9. Cairnie L.R. and Harrison A. Natural Convection adjacent to a vertical isothermal hot plate with a high Surface-to-ambient temperature difference // Int. J. Heat Mass Transfer. 1982. Vol. 25. № 7. P. 925—934.
10. Кутателадзе С.С., Кирдяшкин А.Г., Ивакин В.П. Турбулентная естественная конвекция у изотермической вертикальной пластины // Теплофизика высоких температур. 1972. Т. 10. № 1. С. 91.
11. Fujii T., Takeucki M., Fujii M., Suzaki K. and Uehara Y. Experiments on Natural Convection Transfer from the Outer Surface of a Vertical Cylinder to Liquids // Int. J. Heat Mass Transfer. 1970. Vol. 13. P. 753—787.
12. Warner C.Y. Turbulent Natural Convection in Air Along a Vertical Flat Plate // PhD thesis University of Michigan, Ann Arbor, Mich., Dec. 1966, available through University Microfilms, Ann Arbor, Mich.
13. Чумаков Ю.С. Распределение температуры и скорости в свободноконвективном пограничном слое на вертикальной изотермической поверхности // ТВТ. 1999. Т. 37. № 5. С. 741—749.