

УДК 536.25, 536.24

## Экспериментальное изучение свободно – конвективного охлаждения теплонагруженных поверхностей

**Данин В.В.**, gaz402@mail.ru,

*Д-р техн. наук* **Цветков О.Б.** Max\_iar@irbt-itmo.ru

*Университет ИТМО*

*Институт холода и биотехнологий*

*921002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*д-р техн. наук* **Кректунув О.П., Семашко С.Е.**, semashko@nio.spbaer.ru

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский*

*и проектно-конструкторский институт АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ*

*Приведено описание экспериментального стенда для изучения локальной и средней теплоотдачи. Проведен анализ существующих литературных данных по свободной конвекции у вертикальных обогреваемых пластин и труб. Показано, что различия коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции по данным ряда работ может достигать 70 %. Достаточно малоизученным вопросом является теплоотдача у вертикальных труб, особенно при турбулентном режиме течения воздуха. Авторами статьи проведено исследование свободной конвекции у вертикальных обогреваемых и охлаждаемых одиночных труб при граничных условиях третьего рода для последующей валидации трехмерных расчетных кодов.*

*Ключевые слова:* свободная конвекция; вертикальная теплонагруженная поверхность; интенсивность теплообмена.

---

## Experimental studying is free – convective cooling of the heatloaded surfaces

**Danin V.V.**, gaz402@mail.ru, **Tsvetkov O.B.**

*University ITMO*

*Institute of Refrigeration and Biotechnologies*

*191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

**Krektunov O.P., Semashko S.E.,**

*St-Petersburg Scientific-research and Project Design Institute "ATOMENERGOPROEKT "*

*The description of the experimental stand for studying of a local and average thermolysis is provided. The analysis of existing literary data on free convection at vertical warmed plates and pipes is carried out. It is shown that at free convection according to a number of works 70% can reach distinction of coefficients of a thermolysis. Rather low-studied question is the thermolysis at vertical pipes, especially at a turbulent mode of a current of air. Authors of article conducted research of free convection at vertical warmed and cooled single pipes under boundary conditions of the third sort for the subsequent validation of three-dimensional settlement codes.*

*Keywords:* free convection; vertical surface; heat exchange.

---

В мире насчитывается не более пяти крупномасштабных установок (Япония, Франция, США, Россия), способных генерировать турбулентное течение при значениях числа Релея порядка  $10^{11}$ – $10^{12}$ . В России существует единственная установка для

исследования вертикальной пластины высотой 4,95 м, где реализованы все три режима течения: ламинарный, переходный и развитый турбулентный, вплоть до значения числа Грасгофа  $Gr = 5 \times 10^{11}$ . В различных инженерных системах зданий и сооружений, таких как системы солнечной энергетики, системы пассивного отвода тепла в хранилищах отработанного ядерного топлива, в энергосберегающих технологиях для отвода и подвода тепла к теплообменным поверхностям широко используются свободноконвективное течение воздуха, что позволяет отказаться от различного рода нагнетателей. Размеры такого теплообменного оборудования составляют по высоте 5–10 м при диаметре труб 25–800 мм. Значения чисел Релея могут достигать  $Ra = 10^{12}$ , температурный напор 5–100 К. Различие рекомендуемых значений коэффициента теплоотдачи при свободноконвективном течении воздуха у вертикальных обогреваемых пластин достигает 70%. Приводимые в литературе рекомендации базируются в первую очередь на экспериментальных данных, полученных на пластинах, в то время как теплообменные поверхности часто формируются из труб различных диаметров. Это снижает достоверность расчетов ответственного теплообменного оборудования. Крайне противоречивы литературные данные по границам переходной области.

Опыт численного моделирования пристенных свободноконвективных течений базируется на алгебраических и дифференциальных моделях турбулентной вязкости, применяемых в пакетах программ типа ANSYS, Fluent и аналогиях Рейнольдса между переносом импульса и тепла. Многочисленные данные указывают на значимую роль в свободноконвективных потоках именно тепловых факторов и целесообразность отказа от аналогии Рейнольдса [1].

В настоящей работе для получения свободно-конвективных потоков создана экспериментальная установка в помещении, которое удовлетворяет следующим требованиям: высота помещения более 15 метров, объем помещения более  $80.000 \text{ м}^3$ , подвижность воздуха не превышала  $W \approx 0,01-0,0015 \text{ м/с}$ , изменение температуры воздуха по высоте не более  $\Delta t \approx 0,5^\circ \text{C}$ . В помещении отсутствовали открытые нагревательные элементы, а также была обеспечена защита от попадания солнечного света в область проведения исследований, что исключало погрешности, обусловленные неточностью определения лучистой составляющей теплового потока, а также погрешностью измерений тепловых потоков в частности, градиентным методом. В качестве объекта исследования использована металлическая труба диаметром 48 мм, толщиной стенки 3,5 мм, длиной 6 метров. Нагрев или охлаждение исследуемого объекта осуществляется с помощью вихревой трубы Ранка, являющейся безынерционным источником тепла и холода. Вихревая труба Ранка представлена на рис. 2. Исследования для вертикального расположения трубы позволили смоделировать несколько режимов течения (ламинарный, переходной и турбулентный).

Рисунок 1- Схема экспериментальной установки для изучения свободно-конвективного течения.

1- Труба стальная ( $d=48\text{мм}$ ,  $L=6000\text{мм}$ ), 2 - воздушный компрессор, 3 – редуктор, 4 – вихревая труба Ранка, 5;6 – регулирующие клапаны для смешивания холодного и горячего воздуха (5- клапан горячего воздуха, 6- клапан холодного воздуха).

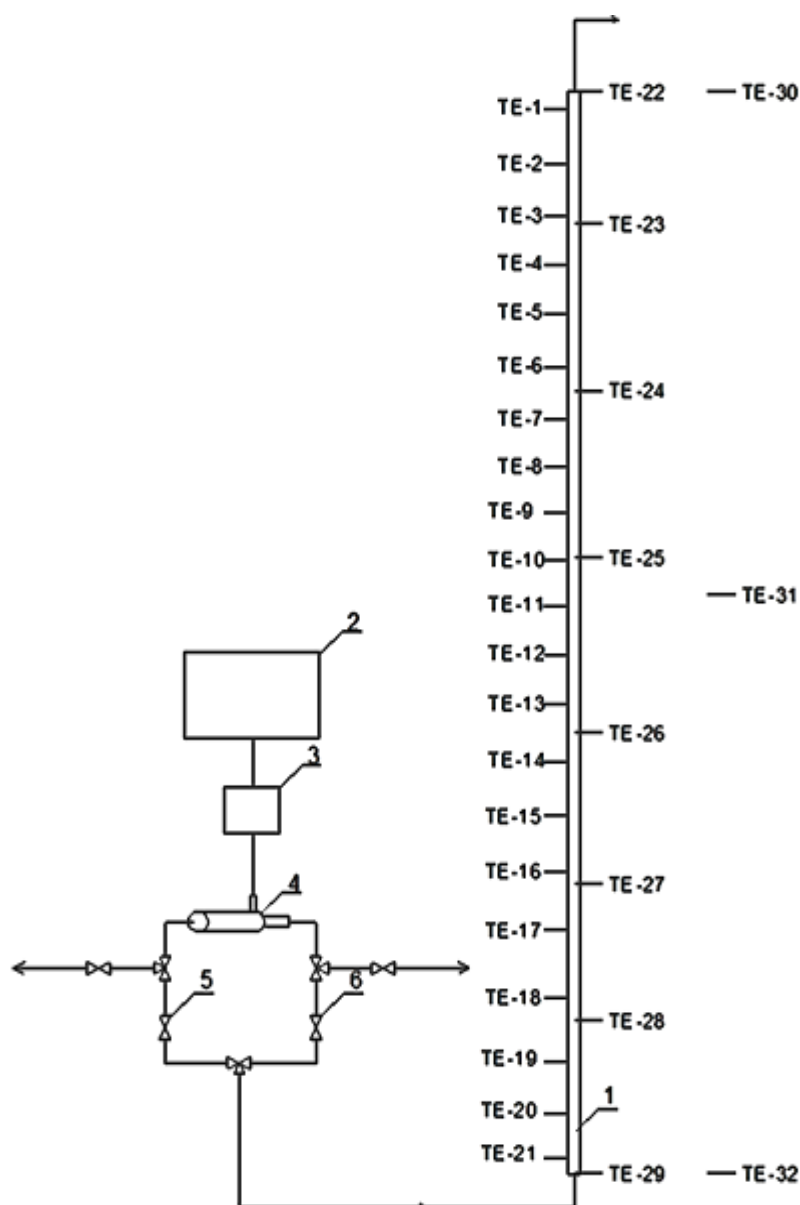
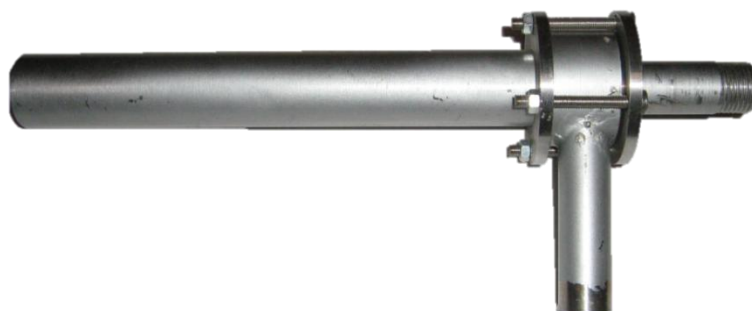


Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В экспериментах измеряли: температуру воздуха в помещении (3 датчика), влажность воздуха, температуру поверхности трубы (21 датчик), температуры воздуха внутри трубы (8 датчиков), перепад температур воздуха на входе и выходе из трубы, перепад давления воздуха на входе и выходе из трубы. Скорость воздуха, движущегося внутри трубы измеряли зондами многофункционального прибора «testo-445»: трубкой Пито, анемометром и термоанемометром. Для создания равномерного («плоского») по сечению трубы профиля скорости с минимальной толщиной пограничного слоя

применялся хонейкомб, набранный из круглых полиэтиленовых трубок диаметром 4мм. Это позволило в процессе опытов не проводить измерение профиля скорости, а расход определять по измеренной скорости в центре трубы за хонейкомбом. Измерена степень черноты поверхности исследуемой трубы. Температуру поверхности поддерживали с помощью термостатирующей установки «Loip LT100», температуру поверхности измеряли: тепловизором «Flir CS 620» и пирометром «Raytek Raynger ST 25» при температурах 20-90 °С. Степень турбулентности потока воздуха фиксировали полупроводниковым лазерным доплеровским анемометром (ЛДА) конструкции Юраса С.Ф. [22]. Подвижность воздуха вне пограничного слоя измеряли шаровым термоанемометром Testo-445.

Рисунок 2 -Вихревая труба Ранка.



Важным моментом методики измерения пульсаций скорости является так называемый засев потока, т.е. внесение в него светорассеивающих частиц требуемого размера и концентрации. Частицы должны быть достаточно малыми, чтобы их скорость отслеживала скорости потока в высокочастотной части спектра пульсаций скорости. Чем выше частота пульсаций, тем больше может оказаться несоответствие между скоростью частицы и скоростью исследуемого потока. В качестве трассеров использовали капли рабочей жидкости JEM SP mix, создаваемые генератором тумана «ROSCO FOG/SMOKE MACHINE 1500». Плотность жидкости – 1,06 г/см<sup>3</sup>; коэффициент преломления – 1,4; размер частиц около 0,8 мкм. С методической точки зрения капли жидкого аэрозоля пригодны для использования в экспериментах по определению скорости и степени турбулентности с помощью ЛДА. К достоинствам ЛДА можно отнести:

- отсутствие необходимости градуировки прибора (метод является абсолютным);
- высокое пространственное разрешение (измеряется локальная скорость в заданной точке потока);
- высокое временное разрешение (измеряется “мгновенная” скорость потока).

Стенд оборудован системой сбора данных. В режиме реального времени производили опрос датчиков, а также архивирование полученных данных в табличном и графическом виде. В процессе экспериментальных исследований производили контрольные измерения температур с помощью пирометра и измерителя плотности теплового потока.

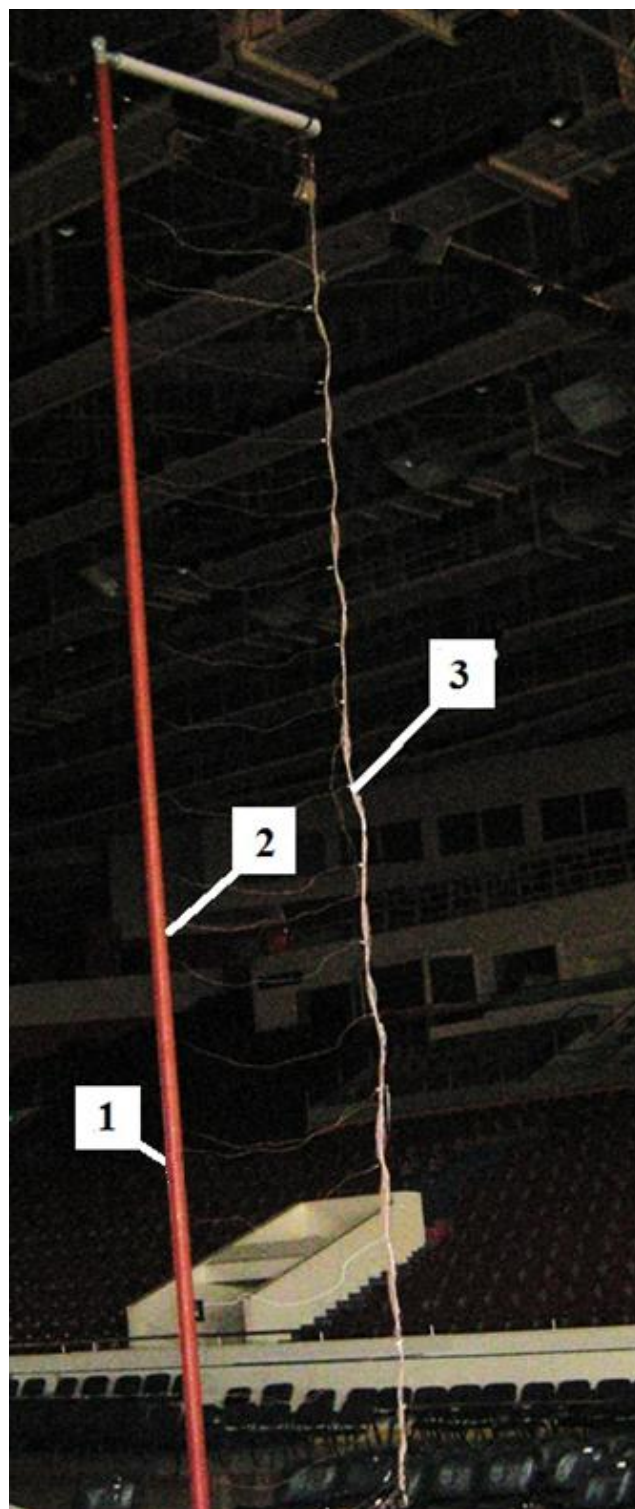


Рисунок 3 - Экспериментальная установка в процессе монтажа.  
1- Труба стальная ( $d=48\text{мм}$ ,  $L=6000\text{мм}$ ,)  
2,3- датчики температуры.

## Анализ работ по теплоотдаче при свободной конвекции

Теплоотдача при свободной конвекции у вертикальных пластин и труб при турбулентном режиме ( $Ra \geq 10^9 - 10^{12}$ ) описывается зависимостью:

$$Nu_m = C \times Ra_m^n \quad (1)$$

где  $C$  варьируется от 0,1 до 0,17;  $n=1/3$ ;  $Ra_m = Gr_m \times Pr$ ;  $Ra_m$  - критерий Релея;  $Gr_m$  - критерий Грасгофа;  $Pr$  - критерий Прандтля;  $Nu_m$  – среднее значение критерия Нуссельта. Основной задачей исследований являлось уточнение коэффициента  $C$ , критериальных зависимостей как для средней, так и для локальной теплоотдачи.

Таблица 1–Значения коэффициентов  $C$  и  $n$  в турбулентной области

Поверхность теплообмена	$n$	$C$	Источник
Вертикальные трубы диаметром 28-245 мм	1/3	0,17	[2-4]
Вертикальные трубы и проволока	1/3	0,148	[5]
Плоские вертикальные стенки, проволока, вертикальные и горизонтальные трубы, шары	1/3	0,13	[6]
Плоские вертикальные стенки, проволока, вертикальные и горизонтальные трубы, шары	1/3	0,15	[7]
Вертикальная пластина	1/3	0,12	[8,9]
Вертикальная пластина	1/3	0,1	[10]
Вертикальные трубы	1/3	0,1	[11]
Вертикальные трубы	0,4	0,02	[12]

Различия данных экспериментальных работ обусловлены рядом причин [12]: радиационный теплообмен, который в части опытов превосходил конвективный; тяга или токи под действием посторонних источников, что сказывается на подвижность воздуха и его турбулизацию; стратифицированная окружающая среда; трехмерные эффекты и кривизна вертикальных поверхностей.

Существенная погрешность, обусловлена неточностью определения лучистой составляющей теплового потока из-за некорректной оценки степени черноты. В работах, где удельный тепловой поток определялся градиентным методом, погрешность может быть обусловлена неточностью оценок градиента температур вблизи стенки и неточностью определения температуры стенки экстраполяцией температуры газа в

пограничном слое. В ряде случаев авторы работ не учитывали подвижность воздуха и его турбулентность. Не все авторы указывали определяющую температуру, значения от которой зависят теплофизические свойства, входящие в числа:  $Nu_m$  и  $Ra_m$ .

Анализ работ по пограничному слою на пластинах и продольно обтекаемых телах вращения показывал, что существенную роль на границы переходной зоны **может влиять** степень турбулентности набегающего потока. Так, **например по** Жукаускасу А.А. степень турбулентности предлагает оценить по приближенной формуле [14]:

$$\frac{Nu_f}{Nu_{f0}} = 1 + 0,41th(0,2Tu) \quad (3)$$

где  $Tu$  – степень турбулентности набегающего потока, в %;  $Nu_{f0}$  – теплоотдача при вынужденной конвекции и  $Nu_{f0}; Tu = 100\sqrt{\overline{u'^2}/U_0}$  – степень изотропной турбулентности, причем средние пульсации скорости в направлении трех осей координат равны:  $\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2}$ , %;  $U_0$  - характерная скорость процесса. Для пограничного слоя за  $U_0$  выбирают скорость набегающего потока. При сравнительно малых значениях степени турбулентности  $Tu$  переход к турбулентному режиму не зависит от турбулентности внешнего потока, а определяется характеристиками ламинарного слоя (его устойчивостью). При свободноконвективном теплообмене для определения положение начала или конца зоны смены режима течения газа или жидкости недостаточно единственного параметра (число Грасгофа), поскольку необходим еще один параметр, а именно: тепловой поток от твердой поверхности.

В работе [16] проведено прямое численное моделирование (DNS) турбулентной свободной конвекции воздуха воды вдоль вертикальной плоской нагретой пластины. Использовалась методика Time-developing DNS, основанная на подмене пространственного развития моделируемого течения развитием во времени. Результаты численных экспериментов для воды хорошо воспроизводят подобные вихревые структуры, наблюдающиеся экспериментально. Получены данные об эволюции полей скорости и температуры, пространственно-временных характеристиках, возникающих в пограничном слое вихревых структур. Данные расчета (профилей осредненных и пульсационных величин, уровень теплоотдачи и др.) относительно хорошо согласуются с опытными данными. Прямое числовое моделирование пограничного слоя при естественной конвекции может обеспечить детали, которые трудно получить в экспериментах. Эти данные важны, чтобы понять структуру турбулентности.

Переходная область между ламинарным и турбулентным режимами при свободноконвективным течении воздуха у вертикальной плоской обогреваемой пластины исследована, в [8]. В турбулентной области число  $Nu_\delta$  изменяется пропорционально  $Gr_\delta^{1/3}$  и хорошо согласуется с эмпирической зависимостью:

$$Nu_\delta = 0,107Gr_\delta^{1/3} \quad (4)$$

Здесь в качестве характерного масштаба использована интегральная толщина скоростного пограничного слоя  $\delta = \int_0^{\infty} U/U_m dy$ , где  $U_m$  – максимальная скорость.

Для воды число Нуссельта в турбулентной области относительно близко к эмпирической зависимости  $Nu_{\delta} = 0,236Gr_{\delta}^{1/3}$ , предложенной авторами [18] для естественной конвекции вдоль вертикальной обогреваемой цилиндрической поверхности. Критическое число Грасгофа, основанное на интегральной толщине скоростного пограничного слоя, позволяет оценить границы переходной области:  $Gr_{\delta,кр1} \approx 10^4$  и  $Gr_{\delta,кр2} \approx 7 \cdot 10^5$ . Согласно данным [21], критическое число Грасгофа при свободноконвективном течении около обогреваемой плоской пластины уменьшается по мере роста плотности теплового потока, даже если преобладает излучение. При реализации экспериментов учтено что коэффициент теплоотдачи на вертикальных трубах, начиная с определенного значения диаметра начинает увеличиваться по сравнению с пластиной, поскольку толщина пограничного слоя становится соизмеримой с диаметром.

К примеру для  $x = 5$  м,  $R = 19$  мм и  $Ra = 10^{12}$  имеем  $\frac{\delta}{R} = 7,69$  т.е. толщина пограничного слоя равна:  $\delta = 146,14$  мм. [19, 20].

Представляется что, распространять зависимости, полученные в результате физических и/или численных экспериментов по турбулентной свободной конвекции воздуха у вертикальных плоских поверхностей для труб необходимо с осторожностью, ибо толщина пограничного слоя существенно больше радиуса трубы [16,17].

**Выводы:** В рамках данной работы создан экспериментальный стенд, позволяющий проводить опыты как при нагреве, так при охлаждении поверхности теплообмена. Проведен анализ работ по свободноконвективным течениям около обогреваемых вертикальных пластин и труб. Рассмотрены возможные причины расхождений между расчетными зависимостями, предложенными в литературе.

### Список литературы

1. Чумаков Ю.С. Экспериментальное исследование свободноконвективного течения около вертикальной поверхности. Научно технические ведомости 2004, №2 «СПбГТУ».
2. Михеев М.А., Синельников А.С., Теплоотдача труб в свободном потоке воздуха. I. Трубы малого размера. НТУ ВСНХ №311. Тр. Гос. физ.-техн. лаб., 1929, вып. 8, стр. 33 – 52.
3. Эйгенсон Л.С., Михеев С.П. Теплоотдача труб в свободном потоке воздуха. II. Трубы большого размера. НТУ ВСНХ №311. Тр. Гос. физ.-техн. лаб., 1929, вып. 8, стр. 53 – 69.
4. Кирпичев М.В., Гухман А.А. Теплоотдача труб в свободном потоке воздуха. III. Теоретические выводы. НТУ ВСНХ №311. Тр. Гос. физ.-техн. лаб., 1929, вып. 8, стр. 70 – 74.
5. Эйгенсон Л.С. Законы теплоотдачи от вертикальных цилиндров к двухатомным газам в условиях естественной конвекции. ДАН СССР, 1940, XXVI, №5, с.447 – 450.
6. Михеев М.А. Теплоотдача при свободном движении жидкости. Известия АН СССР, Отделение технических наук, 1947, №10, с.1357 – 1361.
7. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973, 320 с.



8. Tsuji, T., Nagano, Y. Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate // *Int. J. Heat Mass Transfer*. - 1988. - Vol. 31, No. 8. - P. 1723-1734.
9. Hattori Y., Tsuji T., Nagano Y., Tanaka N. Turbulence characteristics of natural-convection boundary layer in air along a vertical plate heated at high temperatures. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2006, 27, №3, 445–455.
10. Saunders O. A., The Effect of Pressure upon Natural Convection in Air, *Proceedings, Royal Society, Series A*, Vol. 157, 1936, pp. 278—291.
11. Clausen A. M., «Advantages of a Cryogenic Environment for Experimental Investigations of Convective Heat Transfer, accepted for publication by the *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 25, No. 8, 1982, pp. 1255—1257.
12. Клозинг А.М. Корреляции для свободной конвекции около вертикальных поверхностей, учитывающие влияние переменности свойств. *Теплопередача*, 1983, т.105, №1, с.123 – 128
13. Kuehn T. H. Radial Heat Transfer and Critical Biot Number With Radiation, Uniform Surface Heat Generation, and Curvature Effects in Convection. *Journal of Heat Transfer* 1978, 100, MAY, 374 – 376.
14. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
15. Себиси Т., Бредшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы. М.: Мир, 1987, 592 с.
16. Абрамов А.Г., Горячев В.Д., Смирнов Е.М. Прямое численное моделирование турбулентной свободной конвекции, развивающейся во времени у нагретой вертикальной стенки. // Международная научная конференция "Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011): труды международной научной конференции (Москва, 28 марта - 1 апреля 2011 г.)", ISBN 978-5-696-04090-5, Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011, с. 374-380.
17. Abedin M.Z., Tsuji T., Hattori Y. Direct numerical simulation for a time-developing natural convection boundary layer along a vertical plate // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. No.19-20. P. 4525-4534.
18. Fujii T., Takeuchi M., Fujii M., Suzaki K., Uehara H. Experiments on natural convection heat transfer from the outer surface of a vertical cylinder to liquids, *Int. J. Heat Mass Transfer* 13 (5) (1970) 587–753.
19. Bayley F. J., An analysis of turbulent free-convection heat transfer, *Proc. Instn Mech. Engrs* 169(20), 1955, 361.
20. Eckert E. R. G., Jackson T, W., Analysis of Turbulent Free-Convection Boundary Layer on Flat Plate, *NACA Technical Report* 1015, 1951.
21. Delarochelambert T. Transition to turbulence in strongly heated vertical natural convection boundary layers. *Eurotherm Seminar 74 Proceedings* March 23-26, 2003 Eindhoven (The Netherlands), pp. 183 – 188.
22. Безлепкин В.В., С.Ф. Юрас, Семашко С.Е. и др. Применение многоточечной системы ЛДА при экспериментальном исследовании системы отвода тепла из контейнента. Труды Одиннадцатой Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» Москва, 27 — 30 июня 2011 г.
23. Дубнищев Ю.Н. Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М: Наука. – 1982, -304с.